

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN AL DISEÑO DE  
PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DE CALIDAD  
PARA SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

FERNANDO POZA SAURA  
INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

2007



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA FÍSICA**

TESIS DOCTORAL: *Contribución al desarrollo de procedimientos de control de calidad para sistemas de bombeo fotovoltaico*

AUTOR: **Fernando Poza Saura**

DIRECTOR: **Luis Narvarte Fernández**

Prof. Titular EUIT Telecomunicación

Tribunal formado por Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid el día 14 de noviembre de 2007

Presidente	: D. Eduardo Lorenzo Pigueiras Catedrático ETSI Telecomunicación UPM
Secretario	: D. Carlos del Cañizo Nadal Prof. Titular ETSI Telecomunicación UPM
Vocal 1	: D. Alfonso Gago Bohórquez Catedrático Electrónica. Universidad de Málaga
Vocal 2	: D. Roberto Zilles Profesor Doctor MS3 Inss de Electrotecnia y Energía. Universidad de Sao Paulo
Vocal 3	: D. Ramón Eyra Daguerre Director Técnico Departamento Ingeniería ISO FOTÓN
Suplente 1	: D. José Fernández Ramos Profesor Titular de Universidad. Universidad de Málaga.
Suplente 2	: D. Jorge Aguilera Tejero Profesor Titular Escuela Politécnica Superior Universidad de Jaén.

Realizado el acto de defensa y lectura de la tesis en Madrid,

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO



## Agradecimientos

Este trabajo es resultado del esfuerzo y sabiduría de mucha gente. Por ello es preciso mencionar en este punto, con el propósito de agradecimiento, a todas las personas a las que esta tesis debe su cuota parte.

A mi Director de Tesis, Luis, por su inagotable ímpetu y por hacer posible las condiciones para que esta tesis se pudiese realizar: en primer lugar, confiar en mí y en segundo lugar conseguir mantener la línea de trabajo del Instituto en el campo del bombeo fotovoltaico. Me arrego momentáneamente en el nombre de todas las personas que se favorecen de los proyectos arrancados desde aquí, y de los que Luis es uno de los principales culpables, para darle las gracias de nuevo.

A Eduardo, siempre clarificador en las encrucijadas, por su enorme experiencia en el sector fotovoltaico, lo que le da una visión que ha sido de gran utilidad en muchos aspectos cubiertos por la tesis. Además (y esto es casi lo más importante) por ser el que sembró en mí la afición por la energía solar.

A Javier, que ha colabrado enormemente en la caracterización de todos los generadores instalados en el proyecto. Tanto en las tareas de medida como en las de interpretación. Y con el que he, no pasado, sino disfrutado, largas horas de trabajo y de estancia en el desierto. Un ingeniero, pero no de los de título.

A José Piñero y Juan Carlos Zamorano, por su inestimable colaboración en todo lo relacionado con el banco de medidas y muchos detalles de el proceso de las medidas en sí. Su tremenda habilidad y experiencia hace que cualquier trabajo en el Instituto tenga garantías de éxito.

Los trabajos de esta tesis también debe su agradecimiento a personas ajenas (formalmente) al Insituto, participantes todas ellas en la implementación del proyecto MEDA.

En Isofotón, empresa encargada de las instalaciones, gracias especiales a Ismael por su disposición y entrega. También con él se hicieron más llevaderas las horas en 4x4. Junto con él debo mencionar forzosamente a Charli, Oscar y a Ramón.

Gracias también a la gente que realizó la instalación y la gestión de los sistemas en Marruecos: Yousuff, Abdelatiff, Mohamed, Saadia, y Latifa, todos de Tichka, a los que además de su trabajo en el proyecto hay que agradecer su enorme hospitalidad. Cada visita a Marruecos se convertía en un placer gracias a ellos.

En Argelia, igualmente debo agradecer su ayuda en la gestión de las visitas y del trabajo originado por el proyecto a Amar Had Jarab, y en Túnez a Abdesalem El Kazer.

En los tres países hay muchas personas, de nombres desconocidos para mí, que trabajaron duramente para que las bombas llevaran a cabo su trabajo: son todos los guardianes de los pozos y los técnicos de cada pueblo que colaboraron en los trabajos de instalación. No solo fueron trabajadores, sino además estupendos anfitriones.

Espero que los esfuerzos llevados a cabo por todos los actores que protagonizan la obra de teatro del suministro de agua en las zonas empobrecidas del mundo, se vean recompensados con un aumento en el número de personas con acceso a agua potable de calidad. *Vale.*

## Resumen

Los sistemas de bombeo fotovoltaico empiezan a tener detras de sí una historia de la que es posible extraer conclusiones exitosas que sirven de utilidad para su evolución en el futuro. Una de ellas es que son una solución idónea, si no la más idónea, para suministrar agua en entornos rurales aislados. Ello es debido entre otras cosas a su bajo mantenimiento y adecuación a las necesidades de agua de los distintos núcleos poblacionales. Otra es la constatación de la aceptación que han recibido por parte de las comunidades que ya estan disfrutando de ellas desde hace algún tiempo, que en muchos casos se cifra en años.

Pero también, y en el capítulo negativo, está el historial de problemas que han presentado si se consider este tipo de sistemas de una manera global como un conjunto de equipos interconectados que, funcionando correctamente entre si, no ha sido estudiado teniendo en cuenta la comunidad en la que se ubica y, sobre todo, no ha considerado detenidamente aspectos como la distribución del agua desde el depósito hasta los puntos de suministro de los usuarios (fuentes comunales, viviendas individuales, abrevaderos o cultivos). Generalmente se ha puesto una frontera ficticia entre el depósito de almacenamiento y la distribución del agua a los usuarios que ha sido muy perjudicial.

Pero no solo ha sido esta cuestión la causa principal de los problemas antes mencionados. Han colaborado también nuevos sistemas y dispositivos no correctamente probados, o inadecuados para ciertos entornos; y, en general, procedimientos de control de calidad aplicados solo a algunas partes de los sistemas.

El cuadro pintado con lo dicho en los párrafos anteriores ha motivado la propuesta de una estrategia en el establecimiento de procedimientos de control de calidad en sistemas de bombeo fotovoltaico. Ésta es la aportación de esta tesis doctoral. La estrategia propuesta consta de varias etapas:

- Propuesta de unas especificaciones técnicas abarcando equipos, distribución de agua, dimensionado, y subrayando la necesidad de ensayar cuidadosamente toda aquella novedad técnica con la fiabilidad como objetivo global. Detalles importantes a tener en cuenta son la estandarización de sistemas desde un punto de vista de suministro de cierto volumen de agua en términos diarios.
- Realización de unos ensayos previos a las instalaciones en laboratorios pertinentes. El diseño y alcance de los ensayos está iluminado por la idea de la sencillez en equipos e instalaciones.
- Identificación de responsables locales de los sistemas y su mantenimiento.
- Instalación de sistemas y revisión temprana de los mismos.
- Revisión de los sistemas una vez instalados, y lo mismo, después de un período de tiempo de funcionamiento.
- Establecimiento de una estructura de mantenimiento local para garantizar una larga vida de los sistemas.

Esta estrategia ha sido implementada en la práctica en un extenso programa de bombeo fotovoltaico ejecutado en Marruecos, Argelia y Túnez. Ha consistido en la

instalación de hasta 52 kW en sistemas de bombeo, que han suministrado agua potable en condiciones a más de 40.000 personas.

Asimismo se han recogido las enseñanzas aportadas por la experiencia que han sido incluídas en todas y cada una de las etapas presentadas.



## Abstract

Photovoltaic pumping systems start to have a long path behind them, so it's possible to extract useful conclusions that can be taken as lessons regarding its future development. One of them is that they are an ideal solution, (if not the best) to supply water in rural isolated environments. This due to, among other things, their low maintenance needs and to the fact that they fit very well to the water needs of rural communities. Another one is the good acceptance from them, from some time now, accounted, in a number of cases, in years.

But also, and in the negative side, we have the problems and incidents background that they present if the system is considered, from a global point of view, like something that consists of a series of equipment interconnected, doesn't have been analysed in relation to the environment where it is installed. Specially if, as it happens fairly common, the distribution of water from the tank to the point of use by users (taps, public springs, etc), hasn't been taken into account. Usually, a fictitious border is placed between the tank and supply water means that has been almost always harmful.

But, what stated above has not been the only reason for the problems shown by these systems. New devices and technologies, not correctly tested have collaborated to this situation, and in general, quality procedures applied only to some parts of the systems.

The scene depicted has motivated the proposal of a strategy in the establishment of quality control procedures in photovoltaic pumping systems. This is the proposal contained in this thesis. This strategy consists of next stages:

- Proposal of a technical specifications covering equipment, water supply, sizing, and underlining the need to test carefully every new technology or device with reliability as the final objective.
- Performing of a set of tests previous to the installation in proper laboratories. Design and reach of these tests are enlightened by the idea of simplicity in equipment and installations.
- Identification of actors in charge of the systems and their maintenance in the final location.
- Systems installation and their early revision.
- Systems revision once installed, and the same after certain working period long enough to watch for problems due to aging.
- Establishing of a local maintenance structure to guarantee a long and reliable systems life.

This strategy has been implemented in practice in a wide PV pumping program executed in Morocco, Algeria and Tunisia. It has consisted of the installation of up to 52 kW in PV pumping systems, that have, from then on, supplied safe water to more than 40.000 people.

Also, the lessons learned have been included in every stage in this work.



# Contribución al diseño de procedimientos de control de calidad para sistemas de bombeo fotovoltaico

<i>1. El bombeo de agua en la historia y objetivo de la tesis.....</i>	<i>1</i>
1.1. Introducción.....	1
1.2. El bombeo de agua a lo largo de la historia.....	3
1.2.1. Las civilizaciones esclavistas.....	3
1.2.2. La primera revolución industrial.....	8
1.2.2.1. Norias.....	8
1.2.3. Máquina de Juanelo.....	12
1.2.3.1. La era de los combustibles fósiles.....	15
1.3. Breve historia del bombeo solar.....	17
1.3.1. El bombeo solar no fotovoltaico.....	17
1.3.2. El bombeo solar fotovoltaico.....	26
1.4. Estado del arte de los sistemas de bombeo fotovoltaicos.....	28
1.5. Objetivo de la tesis.....	32
 <i>2. Especificaciones técnicas para sistemas de bombeo fotovoltaico.....</i>	 <i>35</i>
2.1. Introducción.....	35
2.2. Funcionamiento y especificaciones de sistemas de bombeo fotovoltaico.....	37
2.2.1. Capacidad de bombeo.....	39
2.2.1.1. Consumo de agua.....	40
2.2.1.2. Irradiación solar.....	41
2.2.2. La fuente de agua: altura de bombeo y capacidad de suministro.....	42
2.2.2.1. Tamaño del generador fotovoltaico.....	44
2.2.3. Fiabilidad.....	46
2.2.3.1. Generador fotovoltaico.....	46
2.2.3.2. Convertidor de frecuencia.....	48
2.2.3.3. Motobomba.....	53
2.2.3.4. Cableado.....	54
2.2.3.5. Infraestructura hidráulica.....	55
2.2.3.6. Sistema de potabilización de agua.....	57
2.2.4. Seguridad.....	58
2.2.5. Sencillez en el uso.....	60
2.2.6. Sencillez de instalación y mantenimiento.....	61
2.3. Conclusiones del capítulo.....	62
 <i>3. Modelado de sistemas de bombeo fotovoltaico.....</i>	 <i>65</i>
3.1. Introducción.....	65
3.2. Modelado de la energía producida por un generador fotovoltaico.....	66
3.2.1. La eficiencia de la cadena energética.....	66
3.2.1.1. Eficiencia del generador fotovoltaico.....	67
3.2.1.2. Eficiencia del inversor DC/AC.....	69
3.2.1.3. El “año típico”.....	69
3.2.1.4. La temperatura ambiente.....	76
3.3. Modelado del servicio entregado por una bomba centrífuga.....	77
3.3.1. Relaciones de semejanza geométrica.....	78
3.3.1.1. Variación de la curva característica en función de la frecuencia de rotación.....	

3.4. Cálculo del volumen de agua entregado por una bomba centrífuga trabajando a altura manométrica constante.....	82
3.5. Validación de los modelos.....	83
3.5.1. Escenarios y validación de la energía eléctrica producida.....	83
3.5.2. Validación de los m <sup>4</sup> de agua entregados.....	86
3.5.3. Influencia de la escala temporal de simulación en los resultados de volumen bombeado de agua.....	90
3.6. Conclusiones del capítulo.....	93
4. Procedimientos de ensayo.....	95
4.1. Introducción.....	95
4.2. Reordenación de las especificaciones técnicas.....	97
4.3. Requisitos generales del sistema fotovoltaico de bombeo.....	98
4.3.1. Capacidad de bombeo y tamaño de los sistemas fotovoltaicos.....	98
4.3.2. Especificaciones técnicas de componente.....	98
4.3.2.1. Generador fotovoltaico.....	98
4.3.2.2. Convertidor DC/AC.....	99
4.3.2.3. Motobomba.....	99
4.3.2.4. Sistema de potabilización de agua.....	100
4.3.2.5. Cableado.....	101
4.3.2.6. Estructura soporte.....	101
4.3.3. Especificaciones técnicas de sistema.....	101
4.3.3.1. Aspectos generales de la instalación.....	102
4.3.3.2. Generador fotovoltaico.....	102
4.3.3.3. Convertidor DC/AC.....	102
4.3.3.4. Cableado.....	103
4.3.4. Especificaciones de instalación y montaje.....	103
4.3.4.1. Aspectos generales de la instalación.....	103
4.3.4.2. Generador fotovoltaico.....	103
4.3.4.3. Sistema de potabilización.....	103
4.3.4.4. Estructuras de soporte.....	104
4.3.4.5. Puesta a tierra.....	104
4.3.4.6. Infraestructura hidráulica.....	104
4.4. Ensayos.....	106
4.4.1. Ensayos de laboratorio.....	106
4.4.1.1. Operación normal.....	106
4.4.1.1.1. Ensayo de capacidad de bombeo.....	106
4.4.1.1.2. Ensayo de ciclado.....	108
4.4.1.1.3. Ensayo de operación a alta temperatura.....	108
4.4.1.2. Situaciones anómalas.....	108
4.4.1.2.1. Ensayo de pozo vacío.....	108
4.4.1.2.2. Ensayo de depósito lleno.....	109
4.4.1.2.3. Ensayo de bloqueo del motor.....	109
4.4.1.2.4. Ensayo de sobretensión.....	110
4.4.2. Ensayos “in situ”.....	110
4.4.2.1. Medida de la potencia del generador fotovoltaico.....	110
4.4.2.2. Ensayo de bombeo.....	111
4.4.2.3. Ensayo de depósito lleno.....	114
4.4.2.4. Uso y gestión del sistema.....	114

4.5. Banco de medidas.....	116
4.5.1. Banco hidráulico.....	117
4.5.1.1. Subsistema de mantenimiento de presión de agua.....	118
4.5.1.2. Banco hidráulico.....	119
4.5.1.3. Medidores.....	120
4.5.1.4. Subsistema para el ensayo de ciclado.....	121
4.5.1.5. Suministro de potencia.....	122
4.5.2. Banco de medidas en condiciones extremas.....	124
4.5.2.1. Cámara climática.....	124
4.5.3. Máquinas de medida en el terreno.....	125
4.5.3.1. Caracterización de generadores.....	125
4.5.3.2. Caracterización de pozos o sondeos.....	126
4.6. Conclusiones del capítulo.....	128
 5. Aplicación del control de calidad a un proyecto regional de bombeo fotovoltaico.	
Lecciones aprendidas.....	129
5.1. Introducción.....	129
5.2. El proyecto.....	130
5.2.1. Descripción.....	130
5.3. Aspectos relevantes.....	131
5.3.1. Contrapartes locales.....	131
5.3.2. Comunidades beneficiarias.....	132
5.3.3. Estandarización de los sistemas.....	133
5.3.4. Especificaciones técnicas.....	134
5.4. Procedimientos de ensayo.....	135
5.4.1. Ensayos en el laboratorio.....	135
5.4.1.1. Ensayo de servicio.....	136
5.4.1.2. Ensayo en condiciones de operación anómalas y extremas.....	137
5.4.2. Ensayos sobre el terreno.....	139
5.4.2.1. Capacidad de suministro de los sistemas.....	139
5.4.2.2. Generador fotovoltaico.....	141
5.4.2.3. Ejecución de la instalación.....	142
5.4.2.4. Infraestructuras hidráulicas.....	144
5.4.2.5. Potabilización.....	148
5.4.2.6. Aspectos de integración.....	150
5.5. Aspectos sociales y de gestión.....	151
5.5.1. Consumo de agua.....	152
5.5.2. Operación de los sistemas.....	154
5.6. Lecciones aprendidas.....	156
5.6.1. "hardware".....	156
5.6.1.1. La infraestructura hidráulica.....	160
5.6.1.1.1. Sobre el pozo.....	161
5.6.1.1.2. Sobre los depósitos.....	163
5.6.1.1.3. Sobre las tuberías y otros accesorios.....	164
5.6.2. "Software".....	165
5.6.2.1. Las prioridades de los usuarios.....	166
5.6.2.1.1. Fiabilidad.....	167
5.6.2.1.2. Sabor.....	167
5.6.2.1.3. Esfuerzo.....	168
5.6.2.1.4. La calidad sanitaria del agua.....	169

5.6.2.2. El consumo de agua.....	169
5.6.2.3. La calidad sanitaria del agua.....	170
5.6.3. “Orgware”.....	172
5.6.3.1. Organización de usuarios y gestión de agua.....	172
5.6.3.2. La formación de los usuarios.....	175
5.7. Conclusiones del capítulo.....	180
 6. Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	 183
6.1. Introducción.....	183
6.2. Especificaciones técnicas de bombeo fotovoltaico.....	184
6.3. Modelado de sistemas de bombeo fotovoltaico.....	184
6.4. Procedimientos de ensayo.....	185
6.5. Puesta en práctica del procedimiento de control de calidad en un programa de bombeo real.....	185
6.6. Futuras líneas de trabajo.....	186
 7. Referencias.....	 187
 8. Anexo I: Especificaciones técnicas utilizadas en el proyecto MEDA.....	 193

# Capítulo 1

## El bombeo de agua en la historia y objetivo de la tesis

---

### 1.1. Introducción

Existen muchas formas de leer la historia. Se puede leer relatando las etapas geológicas por las que la tierra ha ido transitando (pleistoceno, etc), describiendo las habilidades instrumentales que los hombres han ido adquiriendo a lo largo de su evolución (paleolítico, neolítico,...), listando los poderes que en cada nación se han ido sucediendo (el listado de los reyes godos es tan solo un ejemplo), o simplemente, narrando las historias del pueblo que ya solo los viejos del lugar conservan y transmiten oralmente. Se puede leer también según las relaciones sociales establecidas en cada época, tal como resume Marx de una forma muy sintética: “La historia de todas las sociedades hasta nuestros días es la historia de la lucha de clases. Hombres libres y esclavos, patricios y plebeyos, señores y siervos, maestros y oficiales, en una palabra: opresores y oprimidos se enfrentaron siempre con la transformación revolucionaria de toda la sociedad o el hundimiento de las clases en pugna”. Hoy habría que añadir ricos y pobres, participantes del sistema y excluidos, útiles para el mercado y no útiles.

Otra forma de leer la historia, especialmente acertada para el tema que nos ocupa en este trabajo, es la de la sucesión de los recursos energéticos que la humanidad ha ido utilizando para su desarrollo. Esta perspectiva interpreta las crisis energéticas como el motor que ha ido moviendo la historia: “El agotamiento de los recursos energéticos es un motor primordial de la historia de los humanos (...):

Las sociedades humanas se comportan como sistemas y, en tal calidad, su

funcionamiento exige un flujo continuo de energía. Para mantener este flujo, los sistemas deben organizarse de tal forma que sean capaces, primero, de captar recursos energéticos externos; segundo, asimilarlos para extraer orden de ellos; y por último, librarse de los residuos resultantes del proceso. En la historia de las sociedades se pueden identificar diferentes ciclos, cada uno asociado a una cierta composición de sus recursos energéticos.

Cada ciclo se inicia con un periodo en el que la abundancia de los recursos permite al sistema mantenerse en un estado estable en su forma, y crecer en tamaño. Este crecimiento del tamaño conlleva el de la presión sobre los recursos, y aumenta progresivamente la dificultad de abastecimiento.

A lo largo de cada ciclo, el sistema intenta contrarrestar esa dificultad de abastecimiento mediante la incorporación de mejoras en la tecnología con la que maneja los recursos, que incrementan la eficiencia energética. Sin embargo, más tarde o más temprano, las dificultades de abastecimiento llegan a ser tan grandes como para comprometer la estabilidad del sistema.

Sobreviene entonces una época de “crisis”, en la que el sistema evoluciona con rapidez a través de un periodo transitorio, caracterizado por la penuria energética, y por la experimentación tecnológica en busca de una mayor disposición de energía, mediante la incorporación de un nuevo recurso.

Mientras dura la crisis, la penuria energética se manifiesta en forma de presión demográfica (población que demanda más energía de la disponible). Para aliviarla, el sistema recurre a limitar la población a la que se permite acceder a los recursos. Las correspondientes válvulas de escape asocian, inevitablemente, tintes dramáticos: hambrunas, luchas intestinas, mortandades elevadas, guerras, emigraciones masivas, etc.

La crisis termina cuando el sistema es capaz de incorporar una nueva tecnología, que restaura la disponibilidad energética, e inaugura un nuevo ciclo. Esta incorporación exige que, además de desarrollar la correspondiente pericia técnica, el sistema transforme su organización, para adaptarse a lo que exige la asimilación del nuevo recurso.

Comparado con el ciclo anterior, el nuevo ciclo siempre comporta: una organización más compleja, una peor relación beneficio/esfuerzo, y un aumento de la densidad energética.

La buena comprensión de esta regla exige algunas aclaraciones:

El agotamiento no debe entenderse tanto como la desaparición física de los recursos, sino como la creciente dificultad para acceder a ellos, que se traduce en progresivas alzas de precios. Por ejemplo, el auge de Atenas en tiempos de Pericles, en el V a.C., disparó el consumo de madera, a consecuencia de varios factores, derivados de su supremacía militar en el Mediterráneo, adquirida cuando la flota de Temístocles venció a los persas de Jerjes en la renombrada batalla de Salamina (480 a.C.): la construcción naval asociada al



mantenimiento de la flota; la construcción civil asociada al crecimiento de la población<sup>1</sup>; la demanda de leña y carbón vegetal para cocinar y calentar las casas; el carbón vegetal que consumían los hornos de la potente industria vidriera y alfarera cuyos productos representaban la alta tecnología de aquel entonces, y que Atenas intercambiaba por materias primas de otros lugares (trigo de Egipto, estaño de la península Ibérica, etc.); y el carbón vegetal que consumían los hornos de las minas de plata de Laurión, con la que la ciudad financiaba su continua expansión. Con tanta prosperidad, el consumo de madera se hizo muy superior a la capacidad de producción de los bosques que rodeaban a la ciudad, acarreando su deforestación y la necesidad de importar madera desde lugares muy lejanos. El consecuente incremento de los precios originó una importante “crisis energética”, en la que es fácil reconocer muchos paralelismos con la situación actual. La necesidad de madera hizo que los atenienses enviaran 10.000 colonos a establecerse en Anfípolis (la antigua capital de Macedonia), para garantizar el suministro permanente de pinos y abetos. También les llevó a desarrollar las primeras viviendas bioclimáticas, constituidas por un patio orientado al Sur, al que dan las habitaciones, que cierran sus paredes por el Norte. Este tipo de viviendas exigía una inversión inicial mayor que las convencionales, pero permitía aprovechar el calor del Sol para calefacción, ahorrando madera o carbón vegetal. Como se ve, la ocupación de territorios extranjeros, productores de recursos energéticos, y la utilización de la energía solar para ahorrar energía en los edificios están lejos de constituir novedades asociadas a los avatares del petróleo.

El intento de compensar la progresiva dificultad en la obtención de recursos, que conduce a su agotamiento, se manifiesta como tendencia a mejorar la eficiencia energética, durante el tiempo en el que el sistema se mantiene en su estado estable. Las crisis energéticas asociadas a la madera (hubo varias en la Historia) proporcionan, de nuevo, ejemplos muy interesantes. Uno, particularmente chocante, fue la costumbre que se extendió en el siglo XIII entre los pobres (o sea, entre la mayoría de la población) del Norte de Francia, de alquilar los fêretros para conducir a los cadáveres hasta el cementerio, donde eran enterrados directamente en la tierra<sup>1</sup> ¡Curioso antecedente del reciclaje de envases, para disminuir el coste energético del manejo de su contenido!”<sup>2</sup>.

Esta lectura de la historia como sucesión de crisis energéticas y adaptación a nuevos recursos permite también analizar la historia del bombeo de agua. A lo largo de su existencia, la humanidad ha empleado su energía en cuatro aplicaciones fundamentales: el riego para la agricultura, el transporte, la industria orientada al comercio y la guerra. Por tanto, el estudio de la historia del bombeo de agua para su uso agrícola aporta una de las claves fundamentales de entendimiento de la historia de la energía y de la humanidad.

## **1.2. El bombeo de agua a lo largo de la historia**

### ***1.2.1. Las civilizaciones esclavistas***

El paso de la recolección a la agricultura exige seleccionar plantas de crecimiento rápido y con un contenido alimenticio relativamente alto, proporcionarles agua y nutrientes, y conservar y procesar los alimentos desde la cosecha hasta el consumo. En un terreno no manipulado los nutrientes circulan del suelo a las plantas (se fijan en ellas

---

1. Numerosos inmigrantes acudían atraídos por la fama de la ciudad vencedora.

cuando crecen) y vuelven de las plantas al suelo (cuando mueren y se descomponen). La agricultura altera este ciclo porque, no sólo extrae del terreno energía solar transformada en materia, sino también nutrientes. En algunos ecosistemas, la propia naturaleza se encarga de reponer anualmente los nutrientes perdidos. Es lo que ocurría, por ejemplo, en el antiguo Egipto con las inundaciones periódicas del Nilo, y por eso precisamente, fue aquí y en otros lugares semejantes (Mesopotamia) donde se establecieron las primeras grandes civilizaciones basadas en la agricultura intensiva. Sin embargo, donde la naturaleza no reponía los nutrientes, la “innovación tecnológica” de la agricultura fracasó, y sólo se mal-mantenía a base de quemar la vegetación primigenia para liberar los nutrientes fijados en los árboles (sistema de “tala y quema”), aportar estiércol al campo y establecer períodos de barbecho y, últimamente, aportando abonos químicos.

Respecto al riego, hay que considerar que las exigencias de la evapotranspiración son del orden de  $1 \text{ m}^3$  de agua por kilo de grano, que pueden equivaler a más de  $3000 \text{ m}^3$  por hectárea y año. El aporte natural depende del régimen de lluvias y de la permeabilidad del suelo, pero son muchos los lugares en los que resulta insuficiente, obligando a los hombres a aportar agua por medios artificiales. Combinar represas, embalses y canales, y bombear desde un río o desde el subsuelo, han sido los más utilizados. El primero es el menos oneroso en términos de esfuerzo humano, pero exige un gran esfuerzo de organización, no sólo por la intendencia y coordinación de las ingentes masas de trabajadores empeñados en su construcción, sino también porque el retorno de la inversión energética exige muchos años de funcionamiento estable del complejo agrícola asociado al sistema hidráulico. Esta es la razón de que estas civilizaciones adoptaran la organización de imperios esclavistas complejos. La lista de grandes obras asociadas al regadío es impresionante: en el valle del río Orontes, en Siria, en donde aún se conserva un dique de piedra de 2,5 Km de longitud que data del 1300 a.C. De época similar data el canal de Nahrwan, entre el Tigris y el Éufrates, que tenía 120 m de ancho y, probablemente, más de 370 Km de largo<sup>3</sup>. Los sistemas de canales, terrazas y champas de las civilizaciones precolombinas en América también constituyeron infraestructuras relevantes<sup>4</sup>. Estudios recientes han mostrado que, antes del siglo V, los mayas modificaron entre  $1.200 \text{ Km}^2$  y  $2.500 \text{ m}^2$  de terreno por el sistema de excavar canales de escasa profundidad para drenar áreas propensas a inundaciones, utilizando el limo para crear campos de extraordinaria productividad<sup>5</sup>. Sólo en los márgenes del río Candelaria, los mayas excavaron hasta 180 Km de canales, entre 3 y 10 metros de ancho y de 1 a 2 Km de longitud, para lo que tuvieron que remover 10 millones de  $\text{m}^3$  de tierra. El correspondiente trabajo se ha estimado en 500.000 jornadas. Otro ejemplo es el aprovechamiento de las corrientes para la distribución del agua en la ciudad perdida de los Incas, Machu Pichu, en la que se consiguió tener un auténtico sistema de distribución de agua, para una ciudad entera, aprovechando solamente la fuerza de la gravedad<sup>6</sup>. Por supuesto, el lector que haya visitado este maravilloso lugar, objetará que la ciudad no era de gran tamaño, y que las grandes pendientes que allí hay por doquier ayudaban mucho en esta tarea. Cierto, pero eso no quita mérito al logro conseguido, que suministraba, por ejemplo, servicios semejantes a las modernas duchas de hoy en día. Eso sí, solo para los personajes más principales de la ciudad. El Gran Canal en China (une el Hoang-ho, río Amarillo, con el Yang-tse-Kiang, río Grande), que tiene 1780 Km de longitud excavados mediante trabajos forzados en el siglo VII para servir de espina dorsal del sistema de drenaje de una vastísima región, es otro impresionante ejemplo.

Las innovaciones tecnológicas de esta época destinadas a facilitar el riego de los campos también son numerosas. El cigüeñal es una máquina inventada por los egipcios en el segundo milenio a.C. y que todavía se usa hoy en muchos lugares. Consiste en una larga pértiga en equilibrio sobre un tablón situado a algo más de un metro de altura sobre el suelo. De un extremo de la pértiga cuelga una vasija y del otro un contrapeso. A la orilla del agua, un hombre llena la vasija tirando hacia abajo de la cuerda que la une a la pértiga. El contrapeso sirve para levantar la vasija hasta la altura del canal donde se vierte el agua para conducirla al campo. Esta máquina facilita el trabajo porque tirar hacia abajo es más cómodo que hacerlo hacia arriba (motivo por el cual también resultan útiles las poleas). En las figuras 1 y 2 se ve la recreación de este sistema en un grabado antiguo y su utilización práctica en Egipto en una fotografía tomada a mediados del siglo XX. Idéntica es la razón de las máquinas que permiten utilizar las piernas para realizar el esfuerzo del bombeo de agua (en la figura 4 se puede ver una bomba de pedal funcionando en unos campos de cultivo de Bangladesh<sup>7</sup>).



*Figura 1: Ilustración de la pértiga para elevar agua.*



*Figura 2: Pértiga elevadora de agua en Egipto.*



*Figura 3: Ilustración de la bomba de pedal.*



*Figura 4: Bomba de pedal funcionando en campos de cultivo de Bangladesh.*

Otro ejemplo es el tornillo de Arquímedes, ideado en el siglo III a.C., se basa en un tornillo introducido en un cilindro hueco, que al girar consigue elevar el agua hasta el nivel definido por su extremo superior (ver figura 5)



*Figura 5: Tornillo de arquímedes bombeando agua desde un río a la acequia que conduce el agua a los campos de cultivo.*



Figura 6: Esquema básico de un viaje de agua o "foggara". El canal por el que circula el agua debe presentar una ligera inclinación para que el agua salga a los campos de cultivo por gravedad.

Por la relación que ha tenido con el trabajo desarrollado en esta tesis consideramos oportuno describir con un poco más de detalle otra de estas innovaciones tecnológicas. Es el caso de las “qanats” en árabe, “foggaras”, en bereber o “viajes de agua” en español, consistentes en galerías subterráneas que iban en busca del agua, y que, una vez encontrada, la conducían hacia los campos de cultivo<sup>8</sup>. La tarea de construcción y mantenimiento era tan ardua, que alrededor de estas infraestructuras se generó toda una organización que fue altamente respetada gracias a lo importante de su función: el reparto del agua y la conservación de las galerías. Los “viajes de agua” fueron una manera habitual de distribución de agua en los países más secos de toda la cuenca Mediterránea y de la zona de Oriente próximo, datando las más antiguas del año 2.000 a.C.. Se cree que el palacio de Persépolis (capital del imperio Persa) recibía el agua de una de estos “viajes”. Algunos cubrían decenas de kilómetros y la estructura de gestión mencionada antes, todavía perdura, y, como se describirá más adelante en este trabajo, nos ha sido de gran utilidad allá en donde los sistemas fotovoltaicos han sido emplazados cerca de estos viajes.

El agua traída por el apreciado “viaje de agua” se reparte entre los campos cultivados en una cantidad que depende del trabajo aportado por sus dueños en la construcción y mantenimiento de las foggaras. Para hacer este desigual reparto (pero probablemente justo), se utilizan los llamados “peines”, que son, como se ve en la figura 7, intervenciones en el canal por el que sale el agua, y que consta de un ensanchamiento previo al reparto, con objeto de uniformizar el flujo de agua en toda la anchura de la acequia, para luego dividirse mediante pequeños pasos de agua de anchura variable y a partir de los cuales el agua se dirige por fin a los respectivos campos. Cada canal saliente del peine tiene una anchura que está relacionado con el trabajo empeñado en la foggara por la familia dueña de la tierra. Como se puede imaginar, la manera en que se mide el trabajo, y su correspondencia con los centímetros de anchura de cada canal esta lejos de ser trivial.

Las infraestructuras hidráulicas del imperio romano, no por conocidas dejan de ser impresionantes. Los romanos, que difundieron la vida urbana ampliamente y basaron varias facetas de su vida en un pródigo suministro de agua -se ha estimado que la Roma imperial recibía más de un millón de metros cúbicos al día, muchos de los cuales se llevaban a las casas particulares por tuberías normalizadas de plomo-, fueron tan



constructores de acueductos como la Inglaterra victoriana lo fue de vías férreas. La misma



*Figura 7: Peine de reparto del agua. Cada canal conduce el agua a su correspondiente campo de cultivo.*

ciudad de Roma fue abastecida por 14 acueductos, en gran parte subterráneos, excepto las últimas diez millas a través de la llanura, en donde se deseaba mantener la altura para la distribución (aunque la conducción de agua mediante tuberías ya era utilizada, la necesidad de superar desniveles obligaba a trabajar bajo presión, y para cantidades de agua importantes como estas, los ingenieros romanos preferían adoptar la solución de conducciones a presión atmosférica). Los más importantes eran el Aqua Marcia de 91'6 Km de longitud y el Aqua Julia de 23. La construcción de un solo acueducto por el emperador Caludio implicó el transporte de 40.000 vagones de toba anualmente durante catorce años<sup>9</sup>.

En las provincias del imperio, los acueductos atraviesan con frecuencia profundos valles, como en Nîmes, donde el puente de Gard, de 274 metros de largo tienen una altura máxima de 32 metros, y en Segovia, cuyo acueducto-puente, de 800 metros de longitud, aún lleva agua<sup>3</sup>.

## ***1.2.2. La primera revolución industrial***

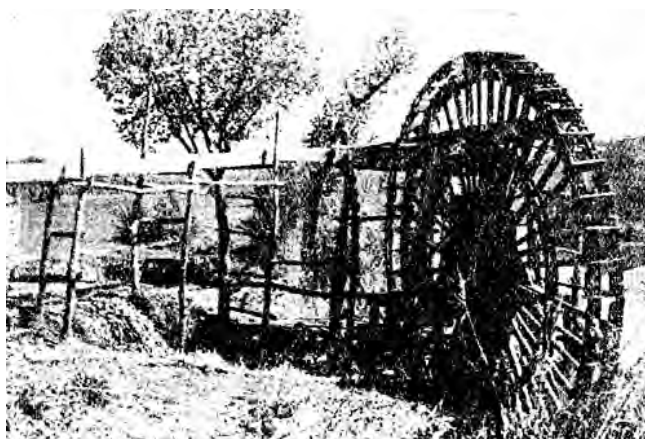
### **1.2.2.1. Norias**

La rueda hidráulica, el auténtico motor de la primera revolución industrial del Bajo Medioevo y del Renacimiento, fue descrita por Filón de Bizancio en el siglo III a.C, es decir, se inventó más de mil años antes de que se utilizara masivamente. La causa de este “retraso” en su uso hay que buscarla en razones sistémicas: la utilización de las invenciones tecnológicas debe esperar a que el sistema los sienta como necesarios y a que su estructura organizativa cambie para adaptarse a su utilización. De hecho, el uso

extensivo de las ruedas hidráulicas para elevar agua para el riego y para mover molinos, mazos, batanes, herrerías, etc., hubo de esperar a que la mano de obra esclava se encareciese mucho. El imperio romano consumía unos 500.000 esclavos por año<sup>10</sup>. A partir del siglo II, el ejército imperial ya no pudo mantener las guerras que aseguraban el suministro de esclavos porque, a pesar de su enorme tamaño (llegó a tener 650.000 efectivos permanentes cuando la reforma de Constantino el Grande), las fronteras eran demasiado extensas y estaban demasiado lejos. Las primeras ruedas y molinos hidráulicos datan de este tiempo, mientras que su posterior expansión aún debió esperar a que se estructurara toda una legislación relativa al derecho del uso del agua que garantizase la rentabilidad de las costosas inversiones que representaba la construcción de los ingenios hidráulicos. Ello no fue posible sino hasta superar las condiciones de inestabilidad social del Alto Medioevo, consecuencia de la desaparición de la organización que siguió a la caída del imperio romano. No es casualidad que el Fuero Juzgo, la recopilación legislativa del siglo VII que regulaba la nueva organización que los visigodos intentaron implantar en la Hispania post-romana, prestaba una atención especial a los asuntos del agua<sup>11</sup>.

De la infinidad de ruedas, norias y ñoras hidráulicas puestas en marcha en este periodo (cuando en 1066 el normando Guillermo I el Conquistador invade Inglaterra, ordena hacer un censo de los bienes del territorio conquistado, en el que figura la existencia de 5.624 molinos de agua para una población de 1.400.000 habitantes, es decir, aproximadamente un molino por cada 250 habitantes; en Francia, por la misma época, había 20.000 molinos para una población de cinco millones de habitantes, lo que conduce a un ratio similar<sup>12</sup>, destacaremos aquí dos por su carácter ilustrativo: las azudas de El Carpio y la máquina de Juanelo.

Parece que fue Arquímedes, en el siglo III a.C., quien primero propuso la noción de que el agua puede dar movimiento y ser elevada por una rueda. En España, tuvieron mucho éxito las “azudas”, que son simples ruedas hidráulicas de paletas, provistas en su perímetro de cangilones para elevar el agua, utilizando el impulso de la propia corriente del río o canal en que se asientan (ver figura 8).



*Figura 8: Azuda de Castro del río, Córdoba.*

Estos ingenios, que presentan sobre las norias las ventajas de carecer de engranajes – lo

que simplifica su construcción y mantenimiento –y no precisar de bestias de tiro, alcanzaron una gran difusión en las regiones más islamizadas de la Península en época medieval, permaneciendo en uso, algunas de ellas, hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX. Es frecuente encontrarlas en la literatura clásica. Por ejemplo, la égloga tercera de Garcilaso de la Vega dice:

*De allí con agradable mansedumbre  
El Tajo va siguiendo su jornada,  
Y regando los campos y arboledas  
Con artificio de las altas ruedas*

Las más notables de estas azudas fueron erigidas durante el Renacimiento, en la población cordobesa de El Carpio, a orillas del Guadalquivir. También llamadas “gruas”, fueron tres ruedas, construidas entre 1.561 y 1.563, que permanecieron muchos años en funcionamiento. A finales del siglo XVII, el ilustrado José Martínez de Mazas señala:

*“Tómense las medidas que se quiera por los ingenieros del mundo, siempre será obra muy costosa y poco útil el sacar las aguas de este río (Guadalquivir) a no ser por medio de Grúas como en El Carpio”*

Medio siglo más tarde, Pascual Madoz en su Diccionario, publicado en 1846, señala:

*“.., y le fertilizan las aguas del Guadalquivir, por medio del célebre artefacto de las Grúas... la obra para colocarlo se hizo el año 1563, y su solidez es tal, que no ha sido necesario ningún reparo a pesar de las avenidas que han ocurrido desde entonces...”*

Parece que cada rueda de las Grúas de El Carpio tenía 14 m de diámetro, estaba provista de 68 cangilones de 115 litros cada uno, y elevaba el agua hasta una altura de 11 m. El canal que la alimentaba tenía una “vara castellana”, es decir, 0'836 m, de ancho y 1'2 m de profundidad. Hoy han desaparecido las ruedas, y una moderna bomba eléctrica eleva las aguas hasta la cota del canal de riego, pero para este aún se utiliza la generosa estructura de cantería de las grúas renacentistas. No cabe, por tanto, duda de que las azudas de El Carpio, con su giro majestuoso e incesante durante más de 300 años, fueron un notable ejemplo de utilidad, solidez y fiabilidad, que las hacen merecedoras del mayor respeto para todo el que se ocupe en la ingeniería energética.

Este tipo de norias para elevar agua fue llevado por España a sus colonias de ultramar, ya que su existencia era desconocida para las culturas precolombinas. Su uso para riego perduró largo tiempo, por ejemplo, en el valle del río Tinguririca, en la provincia de Colchagua (Chile), donde se conservaban todavía hace pocos años unas ochenta azudas para regar las tierras altas, imposibles de regar por gravedad. La mayor de las que se conservan en la actualidad prestando servicio es la de la estancia de Larmahue, de 14 m de diámetro<sup>13</sup> (ver figuras 11y 12)





Figura 9: Grúa de El Carpio



Figura 10: Detalle de la grúa de El Carpio

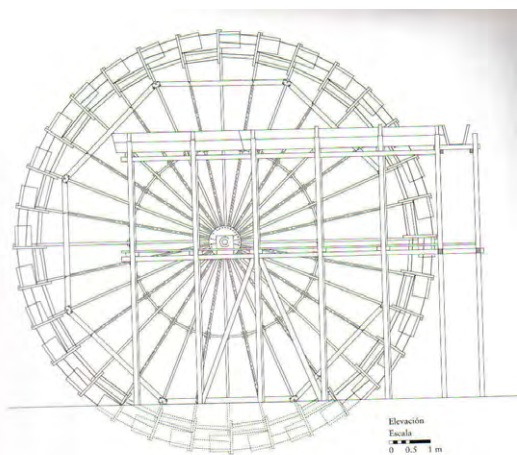


Figura 11: Detalle del diseño de la grúa de Larmahue en Chile

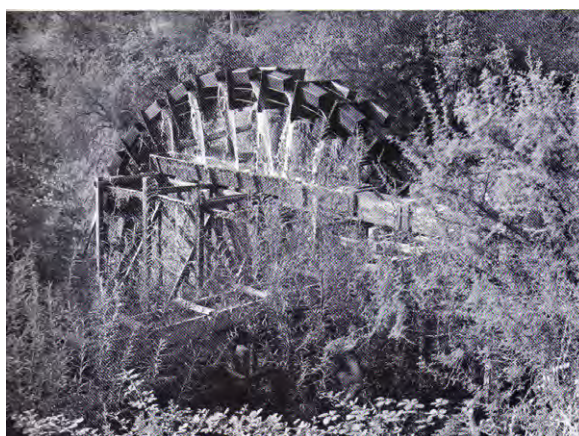
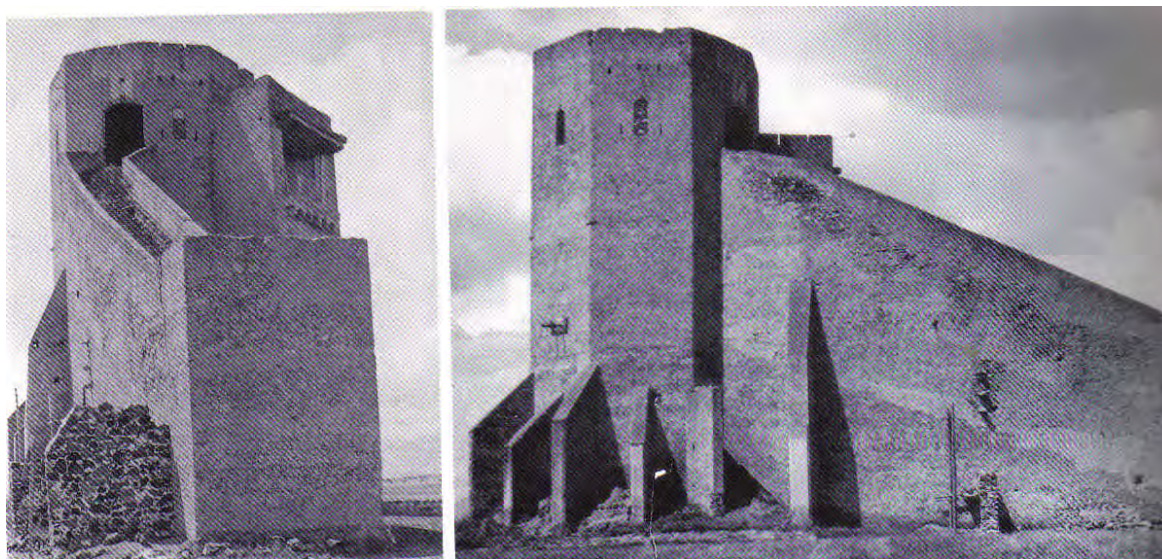


Figura 12: Grúa de Larmahue en funcionamiento.

Además de las ruedas hidráulicas de elevar agua, se emplearon también en las Indias las norias, que se utilizaron, además de en regadíos, para sacar agua de los pozos, dar aguadas a los puertos o servir a usos industriales, como las salinas o el achique minero. De alguna de estas norias coloniales se conservan hoy día sus altas estructuras de cantería, imprescindibles para ganar una cota suficiente para posteriormente distribuir las aguas por

gravedad. Destaca en ellas, como elemento tipológico, las empinadas rampas que daban acceso a lo alto de los torreones y que aún son visibles en algunas de estas norias en la Nueva España, como las que se conservan en el antiguo convento franciscano de Valladolid (Yucatán) y, sobre todo, en la alta torre (provista de contrafuertes exteriores para aumentar su estabilidad) de una hacienda en Teoloyucán (Puebla). Señalaremos aquí una diferencia fundamental entre España y las Indias en el dispositivo de elevar agua. Mientras en las norias españolas de tradición medieval el mecanismo para transformar el movimiento horizontal, en el que gira el animal de tiro, en otro vertical, necesario para subir el agua, se hace mediante dos ruedas dentadas de madera, que engranan con un mecanismo de linterna, las norias americanas pronto utilizaron el mecanismo de malacate, que no requiere ningún tipo de engranaje y es, por tanto, tipológicamente más evolucionado, aunque no permite un flujo continuo del agua como en las norias medievales españolas.



*Figura 13: Noria de la hacienda de Teoloyucán (Puebla, México).*

### **1.2.3. Máquina de Juanelo**

En tiempos del Imperio Romano, Toledo contaba con un acueducto que suministraba agua a la ciudad desde el embalse de Alcantarilla, construido en el siglo II. Pero, en tiempos posteriores al Imperio, una avenida catastrófica destruyó el embalse, y el suministro quedó confiado al rústico procedimiento de los aguadores que, utilizando burros como medio de transporte, la acarreaban desde el río Tajo. Como curiosidad, estos trabajadores eran llamados “azacanes” y en el Tesoro de la Lengua Castellana, editado por Sebastián Covarrubias en 1611, se dice de ellos:

*“[...] en la ciudad de Toledo, adonde comúnmente los aguadores son gavachos, y se hacen muy ricos con un solo jumento o dos. Por estar la ciudad en alto y no haber fuentes, es necesario subirla del río, así para beber de ordinario como para henchir los aljibes, y cuando vuelven éstos a su tierra embastados los remiendos de sus capas gasconas con escudos, dicen de los toledanos: Es suya el agua y vendémossela nos.....”.*

Y así fue hasta que Luis de Escosura, un ingeniero de minas, instalara en el año 1868 unas bombas hidráulicas movidas por una turbina de vapor. El procedimiento de aguadores con burros, además de su dudosa higiene, parecía a muchos poco acorde con la relevancia histórica de la ciudad Imperial que, a pesar de haber dejado de ser corte —en beneficio de Madrid, capital a partir del año 1561— mantuvo una gran importancia durante todo el reinado de Felipe II, lo que motivó que entre los siglos XVI y XIX se sucedieran los intentos de subir el agua desde el Tajo por algún procedimiento tecnológico más avanzado. La mayor dificultad que había que afrontar era el desnivel de 90 m entre el río y el Alcázar, lugar elegido para situar los depósitos de acumulación y distribución de la ciudad. Este desnivel forzaba a las tuberías de las bombas convencionales a trabajar con una presión de 9 atmósferas, enorme para la tecnología de tubos de aquel entonces. La ruptura de tuberías provocaba el fracaso de los intentos e hizo que, para calificar a algo de inverosímil, los toledanos de aquel tiempo inventaran una frase popular que decía “*esto es como subir el río a Zocodover*”. Zocodover es la plaza más concurrida de la ciudad.

El único intento que tuvo éxito fue el llevado a cabo por Juanelo Turriano, que es como se conoció en España al ingeniero italiano Giovanni della Torre, extraordinario relojero y fabricante de mecanismos que acompañó a Carlos I a su retiro de Yuste y, tras su muerte, pasó al servicio de Felipe II. Precisamente por recomendación del rey, la ciudad de Toledo le encargó a Juanelo la construcción de una máquina que fuera capaz de subir 400 cargas de agua en 24 horas, es decir, unos 12.400 litros diarios. Juanelo dio una solución muy innovadora y elegante, construyendo dos ingenios de “cucharones” por los que, mediante un movimiento alternativo, el agua iba subiendo sucesivamente de unos a otros hasta salvar el desnivel que hay entre el Alcázar y el río. El movimiento de los cucharones provenía de una rueda hidráulica de las de “empuje por debajo” instalada en el río, y el truco de hacer subir el agua saltando de un cucharón a otro permitía que ésta estuviera siempre a presión atmosférica, evitando así el espinoso problema de la presión. Como contrapartida, los ingenios eran francamente complicados, de lo que da idea el que cada ingenio, en su conjunto, estuviese compuesto por más de 20.000 piezas, y que estuviese establecida en 24 torres (en la figura sólo se han representado dos), distribuidas a lo largo de un recorrido de 300 m, con una serie de 8 cucharones cada una. El movimiento de la rueda se transmitía a los cucharones por medio de una biela y una intrincada transmisión a base de tirantes de madera y embragues automáticos, que detenían periódicamente el movimiento en cada torre para dar tiempo a que la serie de cucharones llenos de agua transfirieran su carga a los que estaban vacíos. Tal transferencia se hacía por gravedad, de tal forma que, al pasar de un cucharón lleno a otro vacío, el agua descendía un desnivel equivalente al 10% del desnivel ganado con el movimiento del cucharón lleno. Además, para desarenar el agua y evitar así problemas de abrasión en el delicado ingenio, Juanelo instaló una primera etapa de elevación constituida por una noria convencional de 42 cangilones, también alimentada por una rueda hidráulica, que subía el agua unos 14 m hasta un depósito intermedio, donde la tomaba el primer cucharón.

El primero de los ingenios entró en servicio el 23 de febrero de 1565, y su funcionamiento fue excelente. Suministraba 17.000 litros diarios de agua, que era bastante más de lo suscrito en el acuerdo entre Juanelo y los regidores de la ciudad. El ingenio concitó la atención de numerosos visitantes nacionales y extranjeros, y fue referido con frecuencia por los escritores de aquel tiempo:



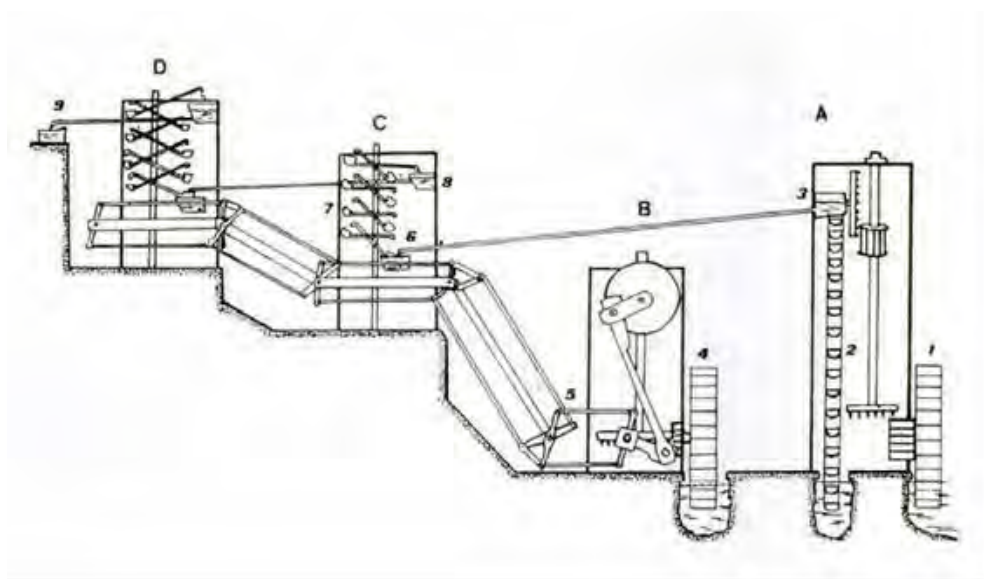


Figura 14: Detalle de la máquina de Juanelo para elevar agua a Toledo

«...le doy al Rey modo de ganarse a Ostende....

- Bien ve vuesa merced que la dificultad de todo está en ese pedazo de mar; pues yo doy orden de chuparle todo con esponjas y quitarle de allí.

Decíame que Juanelo no había hecho nada, que él trazaba agora de subir toda el agua de Tajo a Toledo de otra manera más fácil.... "por ensalmo"...Y al cabo me dijo:

- Y no lo pienso poner en ejecución si primero el Rey no me da una

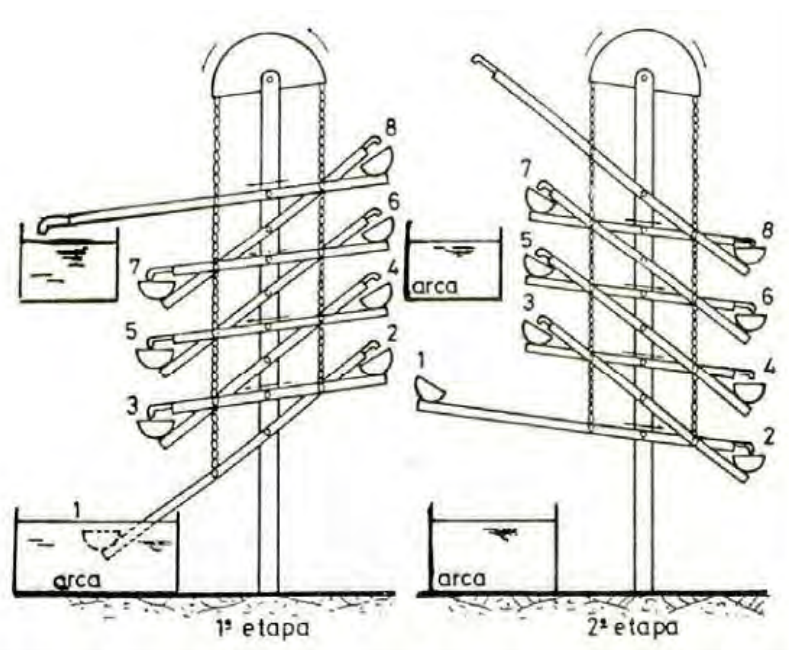


Figura 15: Detalle de la secuencia de movimientos de la torre de cucharones.

*encomienda.»*

(Quevedo, “El Buscón”, Libro 2º - Capítulo 1)

*«Vi el artificio espetera,  
Pues con tantos cazos pudo  
Mecer el agua Juanelo,  
Como si fueran columpios:  
Flamenco dicen que fue,  
Y sorbedor de lo puro:  
Muy mal con el agua estaba  
Que en tal trabajo la puso.»*  
(Quevedo)

*«A vos digo, señor Tajo  
.....  
A vos el vanaglorioso  
por el extraño artificio,  
En España más sonado  
que nariz con romadizo.»*  
(Góngora )

Estos ingenios aportaron mucha fama a su diseñador y constructor pero, paradójicamente, también aportaron su ruina, porque los regidores de la ciudad nunca pagaron lo prometido a Juanelo, que se había endeudado fuertemente para su construcción. En el año 1575, Juanelo se encontraba en una situación desesperada porque no le habían pagado ni los 8.000 ducados prometidos por el ingenio ni los 11.400 correspondientes al mantenimiento de los 6 años que llevaba en funcionamiento (a modo de referencia, una vaca costaba entonces 4 ducados, y el alquiler de una casa unos 14 ducados al año). Los regidores se excusaban diciendo que el agua no beneficiaba a la ciudad, porque se utilizaba toda en el Alcázar. La intervención del rey logró un acuerdo, suscrito el 21 de marzo de 1575, por el que Juanelo se comprometía a construir un segundo ingenio similar al que ya estaba en servicio. El primer ingenio quedaría para uso exclusivo del Alcázar y el segundo de la ciudad, cobrando Juanelo 10.000 ducados del rey y 6.000 ducados de la ciudad. En el año 1581 entró en funcionamiento el segundo ingenio. El rey sí le pagó, pero no así los regidores de la ciudad —que esta vez no se molestaron en buscar excusas— y Juanelo murió arruinado el 13 de junio de 1585. La última carta que, poco antes de su muerte, escribe al rey Felipe II termina con una patética expresión de angustia:

*“[...] por mis muchas deudas y por ser yo extranjero y morir en esta ciudad donde me han tratado como sabe V.Md., queda con mi muerte mi casa en tan extrema necesidad, que se avrá de pedir limosna para me enterrar...”*

### **1.2.3.1. La era de los combustibles fósiles**

La aplicación tecnológica de la física del vapor a la máquina de Newcomen primero, y a la máquina de doble efecto de Watt después, permitió sustituir las ruedas hidráulicas como generadoras del movimiento necesario para los procesos productivos, incluido el bombeo de agua. No era la primera vez que se utilizaba la física del vapor para bombear agua. Jerónimo de Ayanz patentó en 1606 una máquina para bombear agua que aprovechaba la presión del vapor para pasar agua de dos recipientes a otro más elevado (ver figuras 16 y

17).

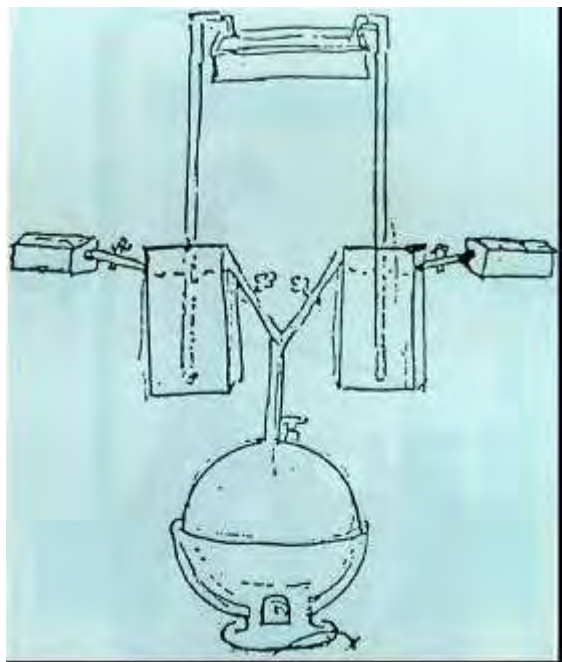


Figura 16: Boceto del ingenio de Jerónimo de Ayanz para bombear agua.

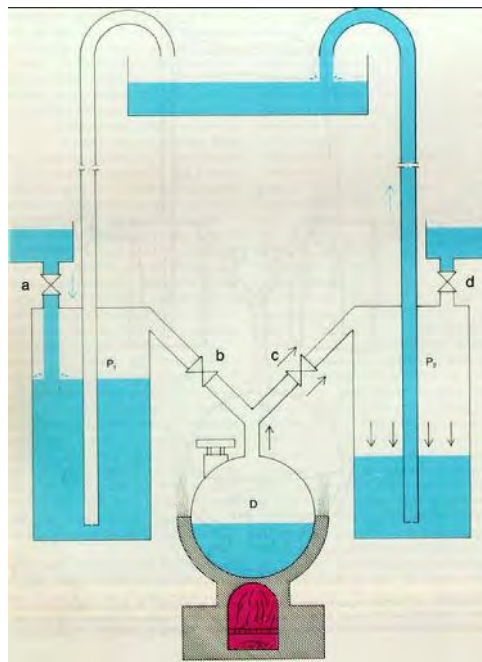


Figura 17: Esquema clarificador del funcionamiento del sistema de bombeo de Ayanz.

El crecimiento de la aplicación de las máquinas de vapor fue espectacular. Entre 1840 y 1880 la potencia total de las máquinas de vapor funcionando en el mundo creció de 2 a 28 millones de caballos de vapor. Esta situación alentó a numerosos ingenieros, preocupados ya entonces por la posibilidad de agotamiento de los combustibles utilizados, a intentar sustituir la caldera de carbón por energía solar para generar el vapor, tal como profundizaremos en la siguiente sección. Estos intentos quedaron abortados con la aparición del petróleo. Los motores diésel permitieron el bombeo, primero, mediante bombas de eje vertical a las que se transmitía el movimiento de manera mecánica mediante correas, y después, mediante alternadores y bombas eléctricas. Esta tecnología se ha mantenido hasta nuestros días a pesar de los altos costes de mantenimiento, sobre todo en las áreas rurales dispersas del planeta donde los repuestos no son fácilmente adquiribles.



Figura 18: Bomba de eje vertical accionada mediante un motor diesel. Se aprecia claramente la correa de transmisión entre el motor y la cabeza superior del eje.

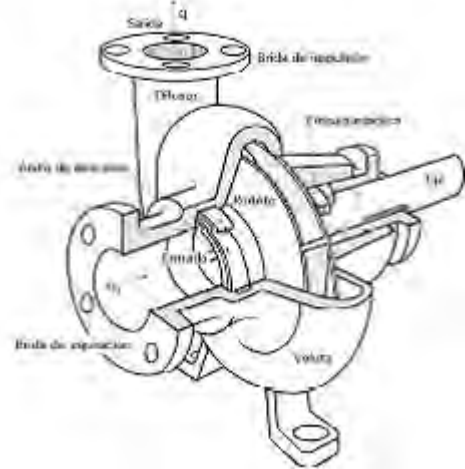


Figura 19: Esquema de una bomba centrífuga de instalación en superficie.

## 1.3. Breve historia del bombeo solar

### 1.3.1. El bombeo solar no fotovoltaico

En Grecia, la escuela de los llamados mecánicos griegos, encabezados por Herón de Alejandría, utilizaron la energía solar para producir vapor, y con éste, movían pequeños autómatas, órganos o silbatos, fuentes de agua (ver figuras 20 y 21), artilugios todos ellos con un objetivo lúdico y espectacular, sin pretensiones de usar este género de técnicas en el mundo de la industria, de la construcción o de la guerra<sup>14</sup>.



Figura 20: Fuente de agua accionada mediante el calor de la energía solar.

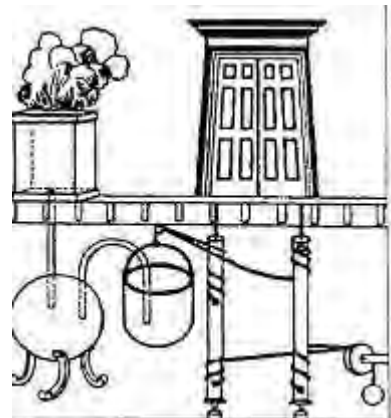


Figura 21: portones que se abren "mágicamente" al encender el fuego sagrado.



En Roma, China y también en Grecia desarrollaron espejos curvados que podían concentrar los rayos del Sol sobre un objeto con intensidad suficiente como para hacerlo arder en pocos segundos. Se trataba de reflectores solares a base de plata, cobre o bronce

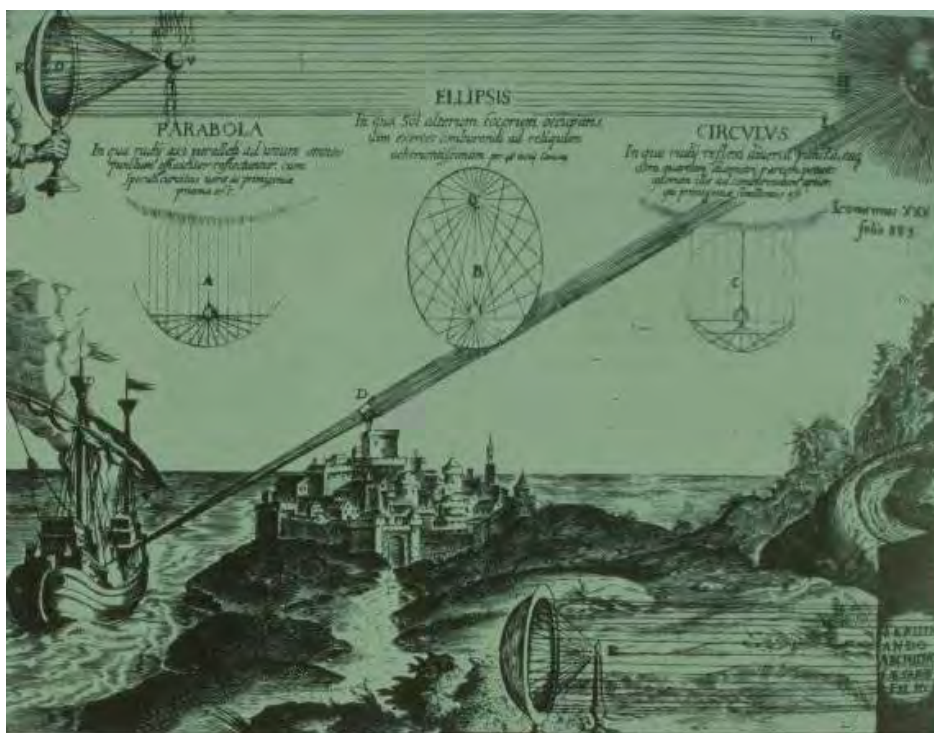


Figura 22: Lámina del *Ars Magna Lucis et Umbrae* de Atanasius Kircher, 1646, en la que se describe figuradamente el funcionamiento de los concentradores solares.

pulimentado. Estos estudios cayeron en el olvido (salvo en forma de mitos, como el que se atribuye a Arquímedes, por el que, supuestamente, utilizó espejos incendiarios para destruir los barcos de los invasores romanos en Siracusa) hasta el Renacimiento, en el que se retoman los fundamentos geométricos y se alcanza el nivel tecnológico que permite la construcción de espejos de suficiente diámetro. En el siglo XVIII Peter Hoesen construye un reflector formado por numerosos y pequeños espejos planos, fáciles de montar sobre un armazón con la forma deseada, alcanzando así la marca de tres metros de diámetro.

En el siglo XVIII, De Saussure construyó un invernadero en miniatura de cinco paredes, realizado con otras tantas cajas de vidrio, de planta cuadrada y dimensiones decrecientes de 30 cm en la base por 15 cm de alto a 10 cm en la base por 5 cm de alto. Las cinco cajas estaban abiertas por su base, de tal modo que podían apilarse, una dentro de otra, todas sobre una mesa de madera negra. Tras exponer el artefacto al Sol durante varias horas, de Saussure midió la temperatura en el interior. La caja exterior era la más fría, aumentando la temperatura en cada caja menor sucesiva. La temperatura más elevada se registraba en la base de la caja más interior (87 grados). El propio De Saussure y después también Herschel y Langley mejoraron este primer prototipo y demostraron que en el interior de una caja cubierta de vidrio podían producirse temperaturas superiores a la de ebullición del agua. Eran conscientes de que la caja caliente podría tener importantes aplicaciones



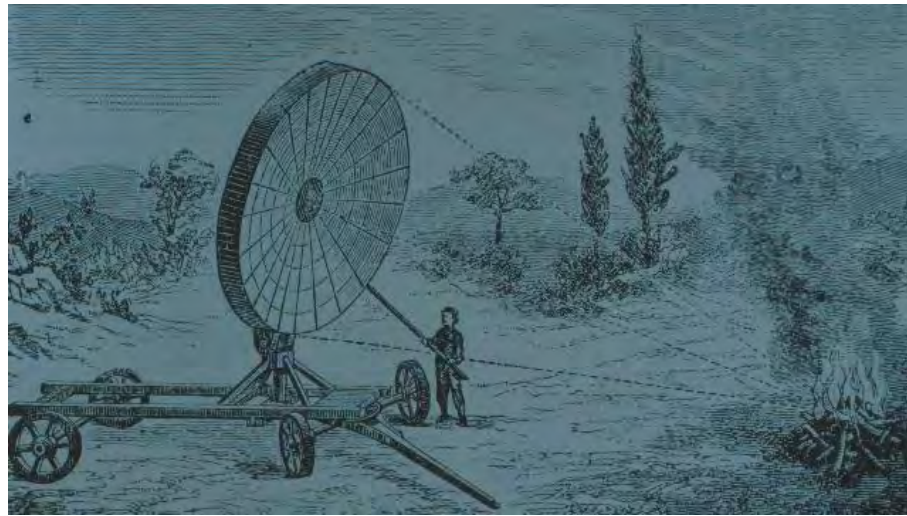


Figura 23: Espejo indendiario de Hoesen.

prácticas. De hecho, De Saussure señaló que "algún día podrá derivarse alguna utilidad de este ingenio [porque] en realidad es demasiado pequeño, barato, y fácil de hacer". Ciertamente su modesta esperanza sería más que satisfecha: la caja caliente se convirtió en prototipo de los colectores solares de finales del siglo diecinueve y del veinte; colectores capaces de suministrar el vapor necesario para mover diversas máquinas, entre ellas las primeras instalaciones de bombeo solar.

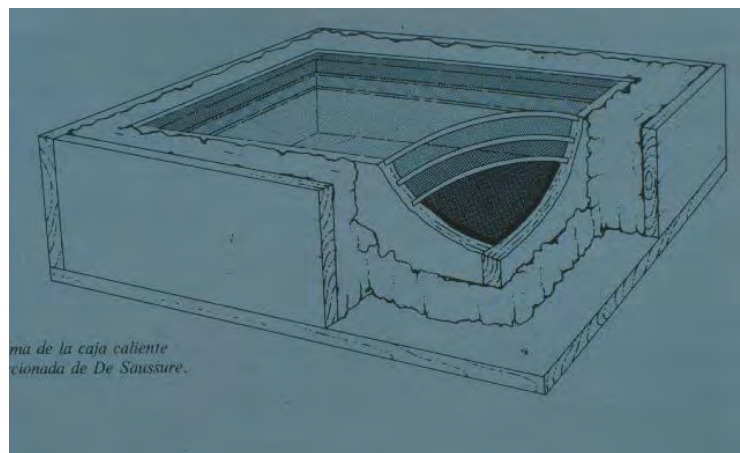
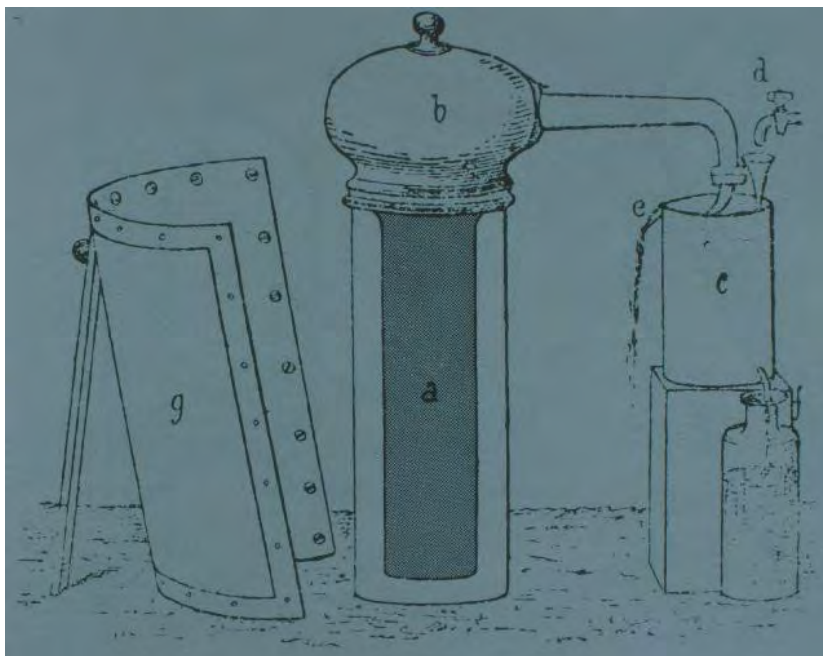


Figura 24: Caja caliente de Saussure, 1767.

El ingeniero francés Agustin Bernard Mouchot, profesor de la escuela de ingeniería de Tours, Francia, comenzó sus estudios sobre la energía solar en 1860 preocupado por la dependencia que su país tenía del carbón. Consideraba este recurso como algo finito, y le preocupaba sobremana la manera de sustituirlo cuando llegase a su fin. Recogió sus experiencias en un libro titulado "La Chaleur solaire"<sup>15</sup>. En él, hacía una revisión de todas las experiencias conocidas relacionadas con el aprovechamiento del calor del sol, como introducción y después describía con todo detalle sus ideas y las realizaciones prácticas llevadas a cabo por él mismo. Sus experimentos buscaban la capacidad calorífica de los rayos solares para evaporar de agua en recipientes cerrados, de manera que se elevase la presión en su interior y aprovechar ésta para generar movimiento. En los días de Mouchot

la máquina de vapor era ya un invento extendido por occidente, e, inevitablemente, el primer objetivo de Mouchot fue sustituir el calor que la movía, proveniente de la quema de carbón o leña en sus calderas, por el calor solar. Disponía para ello de un reflector cónico en cuyo fondo había una caldera cubierta con un vidrio. Dado que utilizaba este rudimentario concentrador solar, necesitaba también contar con un sistema de seguimiento. Finalmente, en lo que fue declarado por un testigo como “un día extremadamente caluroso”, el sistema de Mouchot fue capaz de mover una máquina de vapor de medio caballo de potencia. En la prueba, la máquina fue utilizada, precisamente, para bombear agua a razón de 2.000 litros a la hora. El gobierno de Francia fue testigo de este logro, y en seguida encontró que el ingenio de Mouchot podría prestar estupendos servicios en el protectorado argelino de Francia, una región bendecida con una irradiación solar abundante pero maldecida por una clara necesidad de agua.

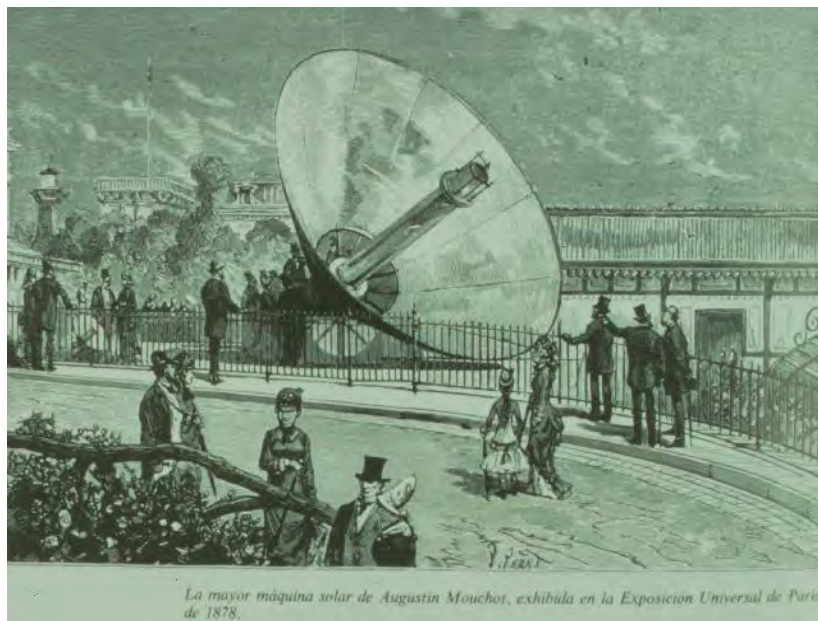
Se hicieron un gran número de experimentos con el sistema de Mouchot para mover máquinas de vapor, en los que se intentaba mejorar la concentración para conseguir presiones de vapor más altas, pero en el tiempo que duraron estas experiencias el escenario global se tornó menos favorable a la energía solar. Las tensas relaciones entre Francia e Inglaterra, que hacían temer el suministro de carbón y que gravaban su precio, se relajaron notablemente. Asimismo, el sistema de transporte del carbón por parte de Francia fue mejorado. Todo junto provocó una pérdida de interés, y en consecuencia apoyo, a los experimentos de Mouchot, de manera que se terminaron por abandonar. Mouchot, que se había trasladado a Argelia para dirigir los trabajos, regresó a su puesto docente en Francia<sup>16</sup>.



*Figura 25: Alambique solar de Mouchot.*

Hubo otros intentos dirigidos a hacer funcionar máquinas de vapor a base de calor solar, y todos tenían el bombeo de agua como objetivo final. Es de destacar el caso de

Williams Adams encargado del registro civil en Bombay, por la modificación introducida en el captador solar con respecto al utilizado por Mouchot. Utilizó espejos planos colocados de manera que reflejaban el sol sobre un punto común en el que se alcanzaban elevadas temperaturas. Esta configuración también necesitaba de un seguimiento del sol, circunstancia resuelta por Williams gracias al concurso de un operario que tenía la misión de mover los espejos “tres o cuatro veces al día”, en palabras de Adams, o más frecuentemente si se quería aumentar el rendimiento. Esta idea es la empleada en las actuales centrales térmicas a base de calor solar (excepción hecha del sistema de seguimiento, por supuesto). El resultado mejoró el de Mouchot consiguiendo mover una máquina de vapor de dos caballos y medio de potencia.



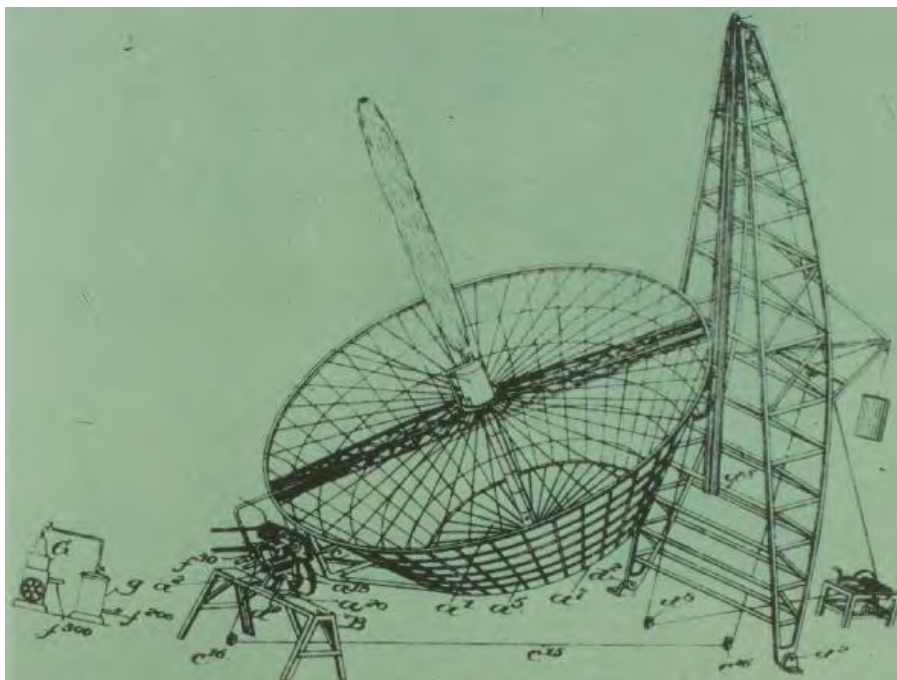
*Figura 26: Máquina solar de Mouchot en la exposición universal de París de 1878*

Mouchot no fue el único, otros ingenieros intentaron poner el calor solar al servicio del hombre, y en casi todos los casos la primera aplicación beneficiada de ello fue el bombeo de agua. Por ejemplo, Aubrey Eneas, originario de Boston y creador de la empresa Solar Motor Company of Boston. El objetivo principal de la empresa era la venta de equipos de bombeo al sudoeste de los EEUU, donde los combustibles convencionales como la madera y el carbón eran escasos y caros. Basándose y mejorando el diseño de Mouchot, Eneas construyó, en 1899, un sistema con un diámetro de 10 metros en la boca del reflector, que estaba formado por más de 1.800 pequeños espejos de vidrio plateado. Distintos mecanismos y artefactos de relojería permitían orientar el espejo hacia el Sol a lo largo del día y de las estaciones, sin excesivo esfuerzo. El conjunto pesaba más de 4 toneladas.

En 1901, el motor quedó instalado en la primera granja de avestruces de los EEUU, en Pasadena, después de haber viajado desde Nueva Inglaterra hasta Denver (donde se hicieron los primeros ensayos), antes de alcanzar su destino final. Las avestruces eran visitadas por el público, que pudieron contemplar también (por el mismo precio) el motor



solar de Eneas en acción. En esencia (según las crónicas de la época) el motor solar accionaba una bomba capaz de irrigar 120 hectáreas de cítricos extrayendo 6.400 litros de agua por minuto de un pozo situado a 5 metros de profundidad (es decir, una potencia de unos 5kW). Hasta 1904 Solar Motor Company vendió e instaló cinco motores solares. El último en la granja de John May consiguió bombear 6.700 litros de agua por minuto, pero



*Figura 27: Dibujo del segundo motor solar de Aubrey Eneas, 1899. Al objeto de seguir el desplazamiento estacional del sol, este espejo troncocónico podía alzarse o bajarse sobre el carril existente en la torre tras él.*

desafortunadamente los espejos del reflector fueron destruidos por una tormenta de granizo. Otro de los modelos instalados con anterioridad fue destruido por un vendaval. Competidores sin escrúpulos en el negocio solar contribuyeron a ensuciar la reputación de Eneas. Aparte de la maledicencia de sus competidores, la importancia de la fiabilidad en aplicaciones de este tipo queda de manifiesto ya en los orígenes del bombeo solar. Con todo, el principal obstáculo a la comercialización de los motores solares era su costo: de dos a cinco veces el costo de una planta de vapor convencional. Aun cuando tras el desembolso inicial no existieran gastos de combustible, el elevado precio inicial desalentaba a los compradores.

En su afán de sustituir la caldera de madera o carbón de las “todopoderosas” máquinas de vapor, los motores solares desarrollados tanto por Mouchot como por Eneas estaban basados en el empleo de reflectores para concentrar los rayos del sol y alcanzar las elevadas temperaturas requeridas. Desgraciadamente este énfasis puesto en las altas temperaturas conducían a problemas de difícil resolución en la época: las elevadas temperaturas en el interior del colector (parte fundamental de estas máquinas) originaban inevitablemente fuertes pérdidas de calor y, además, los reflectores utilizados para obtener altas temperaturas debían ser grandes, complejos y costosos. Una vez instalados resultaban

vulnerables a vientos fuertes y a las inclemencias del tiempo. Para empeorar la cuestión, debían mirar siempre al sol, lo que exigía un operario a tiempo completo o un delicado mecanismo capaz de mover automáticamente los reflectores. Y cuando no había soleamiento directo en días de bruma o nubosos, los colectores concentradores dejaban totalmente de funcionar.

Sin embargo, en un motor solar desarrollado para trabajar a baja temperatura, estos problemas prácticamente desaparecían. Entre los ejemplos de esta alternativa, destaca la bomba solar del ingeniero francés Charles Tellier. En vez de agua utilizó hidrato de amoníaco que hierve a 33°C o el dióxido de azufre que lo hace a 10°C. Tellier conocía las aplicaciones de los líquidos de bajo punto de ebullición fruto de sus investigaciones acerca de la congelación de alimentos, labor por la cual es más conocido. En su bomba solar, el colector solar estaba construido con simples láminas de metal oscuro, entre medias de las cuales circulaba el líquido para ser evaporado. La chapa metálica inferior se aislaba a fin de reducir las pérdidas por conducción. La presión del amoníaco alcanzaba las 2,7 atmósferas y la bomba podía impulsar unos 1.300 litros de agua por hora. Estimó que en un clima con más horas solares que el francés se podrían alcanzar los 3.600 litros de agua por hora.



*Figura 28: Instalación solar de Tellier.*

Willsie y Boyle, dos ingenieros americanos, en 1908 mejoraron el diseño de Tellier. Usaban agua en la caja caliente, que trasladaba su energía al dióxido de azufre mediante un intercambiador. El vapor de dióxido era finalmente el encargado de mover el motor. De este modo, los circuitos en la caja caliente no debían soportar grandes presiones, quedando estas limitadas al circuito, más pequeño, que unía el motor con el intercambiador. Además, acumulaban calor en depósitos aislados que contenían agua, lo que permitió a sus plantas funcionar 24 horas ininterrumpidas. A pesar de su rentabilidad económica (se amortizaban en dos años), dos años después la máquina productora de gas era introducida en el

Sudoeste de los EEUU: quemaba carbón para producir gas artificial, y los motores que consumían gas artificial eran de dos a cuatro veces más eficientes que los convencionales basados en la combustión. De esta manera, el motor solar perdió parte de su atractivo económico cuando el transporte del carbón bajó de precio, y dejó de fabricarse.

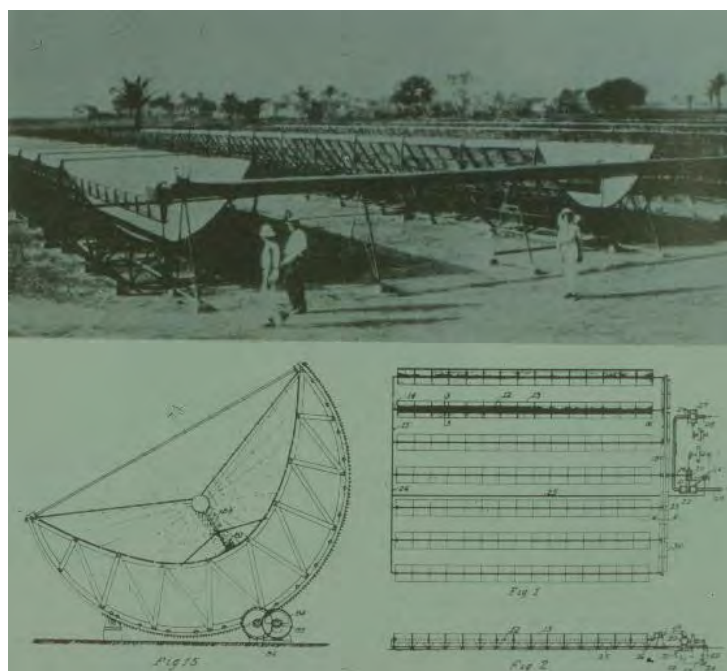
Otro ingeniero autodidacta exploraba también el empleo de colectores de caja caliente para impulsar máquinas de baja temperatura: Frank Shuman. Después de revisar la obra de los que le habían precedido se inclinó por continuar con la misma línea de bajas temperaturas de Willsie y Boyle, salvo que utilizó éter como líquido colector en la caja caliente. Con un modelo pequeño para demostraciones y con un buen talento como propagandista, Shuman consiguió atraer un número suficiente de inversionistas como para crear la Sun Power Company. Para una primera demostración práctica a escala real, la compañía escogió Egipto. Sin embargo la planta habría de construirse primero en EEUU, probarla, desmontarla después y volverla a montar en su emplazamiento definitivo. La planta se alzó sobre 2.700 metros cuadrados cerca de la casa de Shuman en Tacony, Pennsylvania. Uno de los objetivos primordiales era incrementar la cantidad de calor recibida y capturada por los colectores. Para ello añadió a las cajas calientes sendos espejos laterales que reflejaban la luz sobre la caja caliente. Además, un mecanismo permitía ajustar la orientación de los colectores.



*Figura 29: Primer prototipo de la máquina de Shuman instalada en Tacony.*

Shuman también mejoró el motor, haciéndole trabajar a baja temperatura y baja presión, evaporando agua a temperatura menor de 100 grados. Este motor generaba más potencia que cualquier otra máquina solar construida anteriormente. Además sustituyó los colectores concentradores por un único reflector de sección parabólica, en cuyo foco se suspendía una larga caldera recubierta de vidrio. Este sistema, conectado a una bomba, podía elevar 12.000 litros de agua por minuto a una altura de 10 metros (una potencia de unos 20 kW). Casi el 30 por ciento de la energía solar incidente sobre los colectores era transformada en calor útil, produciendo una potencia máxima de 30 caballos de vapor y una media de 14 en un día de sol normal.

Se construyeron cinco reflectores solares en Maadi, a 20 kilómetros de El Cairo, Egipto (ver figura 30), cada uno de 60 metros de largo por 4 de ancho y separados 8 metros entre sí. Además la planta de Maadi podía funcionar las 24 horas del día. El excedente de agua calentada se guardaba en un gran depósito aislado, similar al utilizado por Wisley y Boyle, para su uso durante la noche o en días cubiertos y lluviosos. El motor podía así impulsar una bomba convencional ininterrumpidamente, aumentando todavía más la eficiencia de la planta. En la inauguración, en julio de 1913, el ingenio alcanzó los 55 caballos de potencia y la bomba elevó 27.000 litros de agua por minuto. El dispositivo de absorción captó el 40 por ciento de la energía solar disponible, un resultado muy superior al obtenido por la planta de Tacony.



*Figura 30: Planta solar del Maadi, Egipto*

Las potencias coloniales europeas mostraron su interés por la máquina de Shuman, ante lo cual, Shuman amplió el ámbito de sus planes. Esperaba construir 52.600 Km<sup>2</sup> de reflectores en el Sahara, proporcionando al mundo "a perpetuidad los 270 millones de caballos necesarios para igualar todo el combustible extraído en 1909". Pero su sueño se desintegró con el comienzo de la Primera Guerra Mundial. Los ingenieros de la planta de Maadi dejaban África para ocuparse de trabajos de guerra en sus respectivos países. Shuman regresaba a los EEUU, donde moriría antes de concluir la guerra. Además las potencias europeas empezaban a interesarse por el uso de una nueva forma de energía en sustitución del carbón: el petróleo. Ya en 1919, los ingleses habían invertido más de 20 millones de dólares en la Anglo-Persian Oil Company. Se producían nuevos descubrimientos de petróleo y gas en numerosas partes del mundo (California, Iraq, Venezuela e Irán). Casi todos eran lugares soleados donde resultaba difícil obtener carbón, áreas pensadas por Shuman, y por el mismo Mouchot, como emplazamientos privilegiados para las plantas solares. El petróleo y el gas enterraron así las experiencias de bombeo solar, que no se retomaron significativamente hasta la crisis del petróleo de 1973.



### **1.3.2. El bombeo solar fotovoltaico**

No es hasta la segunda mitad del siglo XX sino cuando se dan las condiciones necesarias para que la nueva tecnología solar fotovoltaica encuentre su oportunidad dentro del panorama energético en general, y en el de su utilización para el bombeo de agua en particular. La crisis petrolífera mencionada al final del apartado anterior fue la que hizo que algunos ingenieros buscaran otras fuentes de energía. En esta época, ya existían una producción de módulos fotovoltaicos, y éstos eran utilizados en campos de la industria muy restringidos como por ejemplo la alimentación de sistemas de señalización: boyas en las costas ó balizas en las vías públicas.

En este escenario, Dominique Campana, ingeniera francesa y apasionada por los problemas medioambientales (que empezaban a surgir con fuerza en estos años), enseguida se preocupó del problema del abastecimiento de agua en zonas aisladas. Su interés general por el entorno le condujo a la energía solar como medio para resolver este problema. En esta época, ya había intentos de bombear agua con motores impulsados por energía solar térmica como los descritos en el apartado anterior, pero perfeccionados con las tecnologías y los materiales de la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo resultaban caros, pesados, voluminosos, tremendamente ineficientes y necesitados de mantenimiento continuo.

Gracias a conversaciones con expertos en el mundo de la energía solar fotovoltaica, Campana pensó en la modalidad fotovoltaica de la energía solar para hacer funcionar bombas de agua. Con la colaboración del fabricante de bombas Guinard, líder en Francia, y Philips como suministrador de módulos, llevó a cabo su idea poniendo en marcha el primer sistema de bombeo fotovoltaico del mundo. Guinard colaboró fabricando un prototipo de bomba para el sistema de Campana sustituyendo el motor de alterna por uno especial de corriente continua, como la generada por los módulos, y además mejorando el rendimiento de la bomba, con lo que el número de módulos necesarios se redujo. El prototipo fue instalado en una granja en la isla francesa de Córcega, residencia habitual de Campana, y allí fue puesto a punto por ella misma. El resultado fue excelente y sirvió para suministrar agua a la granja en sus necesidades diarias.

Mientras tanto, en Mali, años antes de la exitosa experiencia de Dominique Campana, el padre Bernard Verspieren, al frente de una misión católica, era testigo de la dura sequía que sufría el país, y contra la que luchaba mediante una red de bombas manuales instaladas en su área de influencia. No sin esfuerzo, había convencido a las autoridades locales para confiarle fondos con los que costear estas bombas y su mantenimiento. Existen numerosos testimonios suyos<sup>17</sup>, en los que se lamentaba del deficiente suministro de agua que estas bombas eran capaces de dar. La fiabilidad de las mismas dejaba mucho que desear y obligaban a tener un grupo de técnicos que no daban a basto para mantenerlas en funcionamiento.

En estas condiciones, supo del prototipo instalado por Campana, y se las ingenió para visitar las montañas corsas y ver en acción el invento. Según palabras suyas “fue un amor a primera vista”. Sabedor de los problemas sobre el terreno existentes en Mali, casi siempre relacionados con el alejamiento de carreteras de calidad, de la disponibilidad de



personal cualificado, y también conocedor de las bombas de agua accionadas por diesel y por el calor solar, en seguida se dio cuenta de que lo que tenía delante era la solución para los problemas de agua que anhelaba resolver.

Con gran esfuerzo consiguió financiación en Europa y pudo realizar la primera instalación de bombeo fotovoltaica en Nabasso, la ciudad en donde vivía en Mali. La instalación resultó un éxito y el acontecimiento en seguida fue conocido en gran parte del país, y en consecuencia, el padre Verspieren recibió una gran cantidad de solicitudes para replicar su sistema. La gran visión de este hombre, que conocía de primera mano los problemas reales sobre el terreno, le hizo tomar una serie de precauciones que él consideraba necesarias para garantizar un suministro fiable de agua. Básicamente se trata de un concepto, ampliamente aceptado ahora en el mundo de la cooperación, que consiste en hacer que los beneficiarios se ocupen en buena medida de la gestión de los sistemas. Para extender los sistemas de bombeo, imponía como condición que el pueblo costeara los trabajos de alumbramiento del pozo o sondeo, y los materiales. Obligaba a la creación de una estructura social encargada de la gestión del sistema cuyas tareas principales eran: la recolección sistemática de dinero pagado por los usuarios por el servicio para cubrir los gastos de mantenimiento, la realización de un cuidado no técnico (básicamente la limpieza de los paneles y del emplazamiento del sistema) y a mantener lejos de los cables y las bombas a la población general. A cambio, la organización “Mali Aqua Viva”, fundada por él en los orígenes para gestionar las bombas manuales, se encargaría de los posibles problemas técnicos. Suscribimos las palabras del Padre Verspieren cuando dijo:

*“Para mí el coste es secundario. Lo que es de vital importancia es la fiabilidad porque de ella depende la supervivencia de nuestra gente”<sup>17</sup>*

En los años subsiguientes, y gracias al apoyo de agencias de desarrollo internacional, se llevaron a cabo programas de bombeo fotovoltaico de diferentes tamaños. Entre 1990 y 1994, la agencia de cooperación alemana (GTZ) llevó a cabo un proyecto de instalación de 90 sistemas de bombeo, totalizando una potencia de 180 kWp<sup>18</sup>, con el objetivo de demostrar la viabilidad de esta tecnología y los costos reales que conllevaba. Los sistemas se instalaron en varios países: Argentina, Brasil, Filipinas, Indonesia, Túnez, Jordania y Zimbawe, en colaboración con las agencias locales encargadas del suministro de agua de cada país.

Siguiendo el camino abierto por la experiencia en Mali del padre Verspieren, los países integrantes del Comité Permanente Inter-estados en lucha contra la sequía (CILSS, en sus siglas en Francés) (Burkina Faso, Cabo Verde, Gambia, Guinea-Bisao, Nigeria, Senegal, Chad y Mali) lanzaron el Programa Regional Solar (PRS)<sup>19</sup>, financiado por la Unión Europea, con el objetivo de mejorar el suministro de agua en emplazamientos seleccionados empleando criterios de disponibilidad de agua, alejamiento de las vías principales, número de habitantes y grados de compromiso entre otros para la selección de los emplazamientos. La gran novedad que supuso el PRS fue la implantación de un control de calidad en la parte del sistema que va desde el pozo hasta la entrada al depósito. Para conseguirlo, se diseñaron unas especificaciones técnicas y se implantó un control de calidad llevado a cabo en laboratorios independientes consiguiendo como resultado una importante mejora en la fiabilidad de los equipos. Sin embargo, dado que la

responsabilidad de la instalación recayó en la parte del sistema que va hasta la entrada a los depósitos, en posteriores misiones de verificación se observaron una importante cantidad de problemas en las infraestructuras hidráulicas. Estas infraestructuras, siendo buenas para los sistemas previos de suministro de agua, muchas veces presentaban deficiencias cuando se enfrentaban a los sistemas fotovoltaicos instalados<sup>20</sup>.

Lo descrito hasta aquí corresponde al denominado PRS1, pero dado el éxito cosechado por este programa (a pesar de todo), se ha prolongado con el PRS2, que se encuentra, en el momento en que se escriben estas líneas, en fase de ejecución.

Pero el esquema de estas experiencias se ha repetido en otras zonas del mundo. Entre 1994 y 2000, se instalaron 206 sistemas de bombeo fotovoltaicos en los estados Mexicanos de Baja California Sur, Chihuahua, Quintana Roo y Sonora, entre otros. En una buena parte, estos sistemas vinieron a sustituir otros alimentados gracias a generadores diesel<sup>29</sup>. Los resultados, de nuevo, arrojaron una gran fiabilidad en lo que respecta a la parte fotovoltaica, pero, no se dice nada acerca del sistema hidráulico. Lo cual, todo sea dicho, puede ser señal de que no existieron problemas. Pero la cuestión es que, para los evaluadores del programa, no era una cuestión importante como muestra el hecho de que en la encuesta distribuida entre los beneficiarios de los sistemas para evaluar el funcionamiento de los mismos, no había ninguna pregunta específica dedicada a conocer el estado, previo o actual, de las infraestructuras hidráulicas.

Jordania<sup>21</sup>, Tailandia<sup>22</sup>, Brasil<sup>23</sup> y otras zonas de países en vías de desarrollo, han sido beneficiarios de programas similares de mayor o menor tamaño mostrando la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos de bombeo. Por lo tanto, su aceptación ya demostrada exige dar un paso más y trabajar en el aseguramiento de la calidad de estos sistemas, que, como se justificará más adelante, es el objetivo fundamental de esta tesis.

## **1.4. Estado del arte de los sistemas de bombeo fotovoltaicos**

Un sistema de bombeo fotovoltaico consta de los siguientes elementos: un generador (fotovoltaico, incluyendo su correspondiente estructura soporte, con seguimiento o sin él), un equipo adaptador de potencia, una motobomba, unos accesorios de protección y control, y una estructura hidráulica (incluyendo bajo este nombre, depósito, distribución de agua y puntos de aprovisionamiento de agua). Si el objetivo del sistema es suministrar agua para consumo humano, se deberá incluir un sistema de potabilización de agua

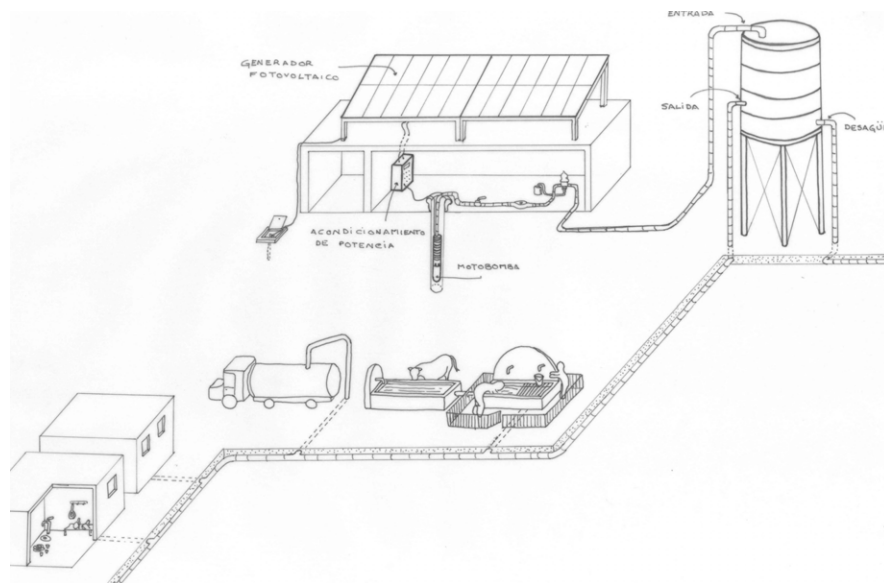


Figura 31: Partes de un sistema de bombeo fotovoltaico.

En la figura 31 se pueden ver los elementos mencionados:

- El generador fotovoltaico tiene por misión suministrar la energía necesaria para el funcionamiento normal del sistema. No hay ningún tipo de requerimiento especial por el hecho de estar destinado a formar parte de un sistema de bombeo. Son perfectamente válidos módulos fabricados con silicio mono o policristalino, y amorfo. Además de los módulos, la estructura soporte se incluye en el generador a efectos de esta enumeración. En lo que respecta a los sistemas de bombeo en zonas aisladas, las estructuras fijas son las más utilizadas.
- La motobomba, constituida por la bomba, propiamente dicha, y el motor que la acciona. Hay dos tecnologías que son las que han resultado más frecuentemente utilizadas, las bombas centrífugas y las de desplazamiento positivo o volumétricas. El motor, por su parte puede ser también de dos tipos distintos: motor de corriente continua (CC) y de alterna (AC). En los primeros días de los bombeos fotovoltaicos, se utilizó el motor de continua para las bombas, dado que los módulos generaban este tipo de corriente. Además, para este tipo de motores, es más fácil controlar su velocidad, lo que hacía posible un mejor aprovechamiento de la cambiante potencia proporcionada por el sol. Sin embargo los últimos avances en la electrónica de potencia, manifestados en forma de equipos como los convertidores de frecuencia, han invertido esta situación, haciendo posible aprovechar una de las más apreciadas características de los motores de alterna: su gran fiabilidad y robustez. La ausencia de colectores de delgas (o escobillas) es su característica más diferencial aunque no la única. El sencillo rotor, llamado rotor en “jaula de ardilla”, es simple y funciona satisfactoriamente en las circunstancias más adversas, dando un excelente servicio con pequeño mantenimiento<sup>24</sup>.
- El equipo acondicionador de potencia. Aunque es posible conectar el generador directamente al motor (si es de corriente continua), se gana mucho en eficiencia intercalando un equipo que, en términos generales, adapte impedancias entre los 2

elementos. En el caso de los motores de continua, la función principal será convertir la tensión de los módulos en una adecuada para el motor y constante a lo largo del día de forma que sólo la corriente varíe (en función de la irradiancia incidente). En el caso de los motores de alterna el concurso de este equipo es imprescindible para convertir la corriente continua en alterna. En los últimos tiempos los inversores ofrecen la capacidad de generar una frecuencia de trabajo variable en función de la potencia de entrada. Son los llamados convertidores de frecuencia que están dando un resultado excelente en sistemas de bombeo ya instalados<sup>25</sup>.

- Los dispositivos encargados de detectar las situaciones anómalas en un sistema de bombeo. Las más importantes son la de depósito lleno y la de pozo vacío. Para conseguirlo se pueden utilizar sensores de nivel, presostatos, boyas o aprovechar las capacidades que presentan hoy en día los convertidores de frecuencia (por ejemplo, la detección de frecuencias de trabajo excesivamente altas).
- Las infraestructuras hidráulicas, tienen por misión conducir el agua, almacenarla y suministrarla a los usuarios. Deben evitar pérdidas de agua y protegerla de agentes externos en todo el recorrido. Además, otros aspectos, normalmente no tenidos en cuenta, pero no por ello secundarios, son los de adecuación a los métodos de aprovisionamiento de agua de los usuarios, y (si es el caso) que tengan en cuenta la idiosincrasia del grupo humano que se va a servir del sistema de bombeo.

A pesar de que en esta descripción los hemos incluido, es normal que en la literatura no se encuentre enumerado como parte de un sistema de bombeo, ni lo que aquí se ha llamado accesorios de protección y control, ni la infraestructura hidráulica. Este “olvido” está en la base del problema que a continuación vamos a describir.

A pesar de que desde hace ya un tiempo considerable, la ingeniería fotovoltaica ha alcanzado estándares de gran calidad, la experiencia en el terreno con los sistemas de bombeo fotovoltaico no es siempre satisfactoria. Por ejemplo, en 1999, 801 bombas helicoidales, de reciente aparición en el mercado, fueron instaladas en el noroeste de Brasil. 337 de ellas se rompieron después de un año de operación, debido a un problema en la unión del eje de la bomba con el motor<sup>25</sup>. Desafortunadamente, siguen fuera de operación hoy en día. En Tailandia, una encuesta sobre 489 bombas fotovoltaicas indicaba que 220 de ellas (45%) habían fallado a los 4 años de su instalación<sup>27</sup>.

Desde 1992 hasta 1996, el ya mencionado Programa Regional Solar (PRS) instaló más de 600 bombas fotovoltaicas en los países del Sahel. Este programa, ampliamente reconocido como un brillante capítulo de la historia fotovoltaica, inauguró la costumbre de aplicar un control de la calidad a las bombas fotovoltaicas. Los resultados pueden observarse hoy en día: cerca de 1'3 millones de personas tienen acceso al agua potable gracias a las bombas del PRS, estando todas ellas en operación y habiéndose observado un tiempo medio entre fallos (MTBF, de sus siglas en inglés) mayor de 5 años<sup>23</sup>.

Sin embargo, incluso un ejemplo tan exitoso como el PRS, presenta problemas de fiabilidad debido al ensayo, únicamente, del sistema de bombeo, sin tener en cuenta, de una manera global, el suministro del agua. Volviendo de nuevo a las referencias del PRS:

*“... muy baja tasa de fallos en lo referente a los equipos solares, sin embargo,... numerosos problemas técnicos (dimensionado, diseño, envejecimiento, etc) se ha observado en la distribución del agua y en los depósitos de almacenamiento, así como en las fuentes o puntos de suministro en general. De los sistemas instalados en Senegal, el 15% de los pueblos tienen agua con una coloración roja, otro 15% tiene, en las tuberías de distribución una presión de agua es demasiado baja, o presentan problemas en las válvulas, u otros elementos de fontanería. Idénticos resultados se han registrado en Malí, con cerca del 13% de los pueblos sufriendo de fugas en las cabeceras del pozo o en las uniones entre tuberías. Estos problemas tienen un impacto directo en el servicio del agua esperado por los usuarios, y por lo tanto en la imagen del concepto del bombeo fotovoltaico ”<sup>20</sup>*

Debido al carácter descentralizado del bombeo fotovoltaico, los usuarios juegan un papel crucial en la construcción y mantenimiento de las infraestructuras básicas: pozos, depósitos, tuberías, grifos, etc. A menudo los programas de bombeo fotovoltaico, a la hora de la implementación, dividen las responsabilidades creando una frontera en la salida de agua del pozo, o a la entrada al depósito. La hipotética empresa fotovoltaica ganadora del concurso de adjudicación, será responsable desde el origen de suministro de agua hasta esta frontera. Mientras que la responsabilidad a partir de este punto hasta los grifos, es dejada en manos de los usuarios, a menudo con la ayuda de las autoridades locales u ONG's. Sea cual sea el caso, esta ficticia frontera representa una amenaza para el aprovisionamiento del agua visto como un todo, debido a las limitadas capacidades técnicas de los usuarios (es oportuno recordar que, en lo concerniente a los sistemas urbanos de suministro de agua, el cuidado del servicio del agua es delegado siempre en organizaciones profesionales) y también a ciertas peculiaridades asociadas a las infraestructuras previas, a veces asociadas a sistemas diesel de bombeo. Este hecho, inevitablemente conduce a plantearse qué debe hacerse para mejorar las capacidades técnicas y organizativas de los usuarios de los sistemas de bombeo fotovoltaico. El estado del arte propociona solamente frases ambiguas como: “los usuarios deben ser involucrados en todas las fases del proyecto”, cuya traducción en prácticas concretas esta lejos de quedar claro<sup>26</sup>. No es extraño, que los aspectos sociales sean citados a menudo como la razón principal del fallo de los sistemas de bombeo fotovoltaico. Marruecos representa un ejemplo relevante. Hasta el 50% de las 500 bombas fotovoltaicas instaladas antes de 2003 estaban fuera de servicio en ese momento<sup>27</sup>. Hasta donde tenemos conocimiento, esta incómoda situación permanece.

Además, el secado de los pozos debido a sequías ha sido reportado como un motivo principal en la interrupción del suministro de agua<sup>28, 29</sup>. En principio, ésto puede evitarse restringiendo las bombas fotovoltaicas a acuíferos suficientemente potentes, y generalmente, solo accesibles a través de sondeos relativamente profundos. Sin embargo, esta posibilidad está, a menudo, fuera de las posibilidades de las poblaciones rurales, y a veces, conduce a aguas con un elevado contenido en sal (debido a que el agua ha permanecido durante mucho tiempo en contacto con rocas solubles), afectando negativamente su sabor. Por lo tanto, la instalación de bombas fotovoltaicas en pozos tradicionales abiertos accediendo a capas freáticas poco profundas y de baja capacidad, será, probablemente, la única alternativa práctica en un buen número de casos.

Por otro lado, la sustitución de bombes alimentados por grupos diesel por sistemas de bombeo fotovoltaico, uno de las aplicaciones más habituales en la actualidad, acarrear problemas de adaptación y fiabilidad asociados a los vicios y costumbres aparejados a los grupos diesel. Baste como ejemplo que en los bombes diesel es habitual que el “pompista” accione la bomba hasta que observe que por el rebosadero del depósito se vierte agua, para lo cual hace falta que el rebosadero esté por debajo del nivel de entrada de agua en el depósito. Esta situación es incompatible con el sistema fotovoltaico.

Todo esto pone de manifiesto, en primer lugar, el riesgo que suponen los últimos avances tecnológicos propuestos en el mercado sin sometimiento a estrictos controles de calidad, pero sobre todo, la necesidad de extender buenas prácticas de ingeniería a todo el conjunto de la cadena del agua: bombeo, almacenamiento y distribución. Buenas prácticas que deberán considerar que el sistema tecnológico se integra en otro social.

## **1.5. Objetivo de la tesis**

Tomando en consideración el actual estado del arte del bombeo fotovoltaico, el **objetivo principal** de esta tesis doctoral es **contribuir a la mejora de la calidad de las instalaciones de bombeo fotovoltaico consideradas como un sistema**, es decir, desde la fuente hasta el consumo, considerando no solo el subsistema de bombeo sino también el de almacenamiento y el de distribución. La consecución de este objetivo pasa por la puesta en marcha de procedimientos de control de calidad que, por un lado, consideren los problemas de fiabilidad que se están dando en los programas de bombeo fotovoltaico descentralizado, y por otro, que puedan ser puestos en marcha en la realidad de los países que están ejecutando este tipo de programas.

Para alcanzarlo, nos planteamos los siguientes objetivos específicos:

- Elaboración de una especificación técnica que, por un lado, garantice la calidad tanto de los componentes como de la globalidad del sistema fotovoltaico de bombeo, y por otro, pueda ser aplicable universalmente.
- Desarrollo de procedimientos de ensayo que permitan comprobar el cumplimiento de la especificación técnica mencionada. Siguiendo una línea maestra establecida en el Instituto de Energía Solar en los últimos años, tanto los procedimientos de ensayo como la instrumentación necesaria deberán reunir los requisitos de simplicidad que permitan su realización en los países donde se ejecutan programas de bombeo fotovoltaico descentralizado.
- Aplicación del procedimiento de control de calidad a un programa de bombeo fotovoltaico real, y evaluación de sus efectos.

Para desarrollar estos objetivos la presente tesis doctoral se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se proponen se proponen unas especificaciones técnicas que abarcan los equipos que pueden formar parte de un sistema de bombeo solar fotovoltaico, así como las distintas interacciones entre ellos al conformar un sistema.

- En el capítulo 3, se propone un modelo que es capaz de predecir el suministro de agua diario que va a entregar un prototipo de sistema de bombeo dado. Las entradas al modelo son: las características del emplazamiento, (irradiancia, altura manométrica total de bombeo y condiciones climáticas) y las características de los equipos propuestos (generador fotovoltaico, motobomba y acondicionamiento de potencia). Este modelo constituye una de las herramientas básicas para la verificación de alguna de las especificaciones propuestas en el capítulo 2. Este modelo se ha validado con medidas realizadas en el laboratorio del IES.
- En el capítulo 4, se describirán los procedimientos de ensayo diseñados para la verificación de las normas enumeradas y justificadas en el capítulo 2. Asimismo, es descrita la instrumentación desarrollada ad-hoc para estos procedimientos de ensayo.
- En el capítulo 5 se describirá la concepción y ejecución de un amplio programa de bombeo fotovoltaico llevado a cabo en el Maghreb (Marruecos, Argelia y Túnez) en el que se ha aplicado el procedimiento de control de calidad propuesto en esta tesis doctoral. Asimismo, se mostrarán los resultados de las medidas realizadas sobre el terreno con los sistemas instalados y en funcionamiento.
- Finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y se proponen líneas de investigación futura orientadas a la consecución del objetivo global de la tesis.

## Capítulo 2

# Especificaciones técnicas para sistemas de bombeo fotovoltaico

---

### 2.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha justificado que la experiencia en el terreno con los sistemas de bombeo fotovoltaico no ha sido siempre satisfactoria. Referimos al lector a los ejemplos mencionados en el capítulo 1 extraídos de la experiencia ocurrida tras la implementación de programas de bombeo de distinto tamaño en Brasil y Tailandia, así como el programa del PRS que cubría varios países de África central.

Partiendo de esta realidad, en este capítulo se propone un estándar técnico que sirva como base para el aseguramiento de la calidad en proyectos de bombeo fotovoltaico. Estas especificaciones son el fruto de la experiencia acumulada en la evaluación de diversos proyectos de bombeo<sup>31, 32, 33, 34, 35</sup> y en particular del proceso de control de calidad puesto en marcha en el proyecto MEDA<sup>36</sup>. Este proyecto ha permitido la instalación de 52 sistemas de bombeo fotovoltaico sumando todos ellos una potencia total de 257 kW<sub>p</sub>, que ha beneficiado, aproximadamente, a unas 50.000 personas. En todos los sistemas, el agua se bombea hasta un depósito elevado desde donde se distribuye hasta las casas en donde, previamente, se ha instalado un grifo y un contador. Este último sirve para aplicar las tarifas correspondientes por el consumo de agua. Este proyecto ha supuesto una oportunidad para reflexionar sobre el bombeo fotovoltaico en general. Los aspectos sociales y de ejecución han sido recogidos en el capítulo 5 de esta tesis. Este capítulo se ceñirá a los aspectos puramente técnicos.

Es importante subrayar, en este momento, que la aproximación considerada aquí para el



aseguramiento de una calidad técnica no exige como prerequisite la acreditación de laboratorios de ensayos por ningún organismo internacional. Por el contrario, se basa en la idea de que la calidad técnica en la electrificación rural es más bien una cuestión de voluntad más que de sofisticación técnica. Los ensayos sencillos (en laboratorios de agencias clásicas, universidades, etc) pueden ser una herramienta efectiva de garantía de calidad técnica si son requeridos en un marco contractual entre vendedores y usuarios. Y es momento de decir que la propuesta de esta alternativa *ad hoc* no pretende competir con los laboratorios acreditados, y mucho menos excluirlos. Cada uno tiene su lugar en la ardua tarea de comprobar criterios de instalación y de realizar el control de calidad en los sistemas de bombeo fotovoltaico. Esta idea está motivada, más bien, por la persistencia de los problemas en el terreno, que permanecen debido a la ausencia de aplicación de cualquier tipo de procedimiento de control de calidad.

La metodología utilizada para desarrollar las especificaciones aquí presentadas se inspira en el “Universal Solar Standard for Solar Home Systems”<sup>37</sup>, norma que ha sido ampliamente utilizada en distintos programas de electrificación rural desde su publicación en 1998 y que pretendió ser lo suficientemente flexible de forma que pudieran considerar las condiciones particulares de cada país (clima, fabricación local, mercado local, capacidad de los pueblos autóctonos, etc), pero manteniendo los requisitos mínimos que permitieran garantizar la calidad. Como entonces, las especificaciones del estándar propuesto en este trabajo se han clasificado en tres grupos: Obligatorias, Recomendadas y Sugeridas.

Los criterios Obligatorios (O) son los que pueden afectar directamente a la seguridad y la fiabilidad. El incumplimiento de estos criterios puede terminar en daños personales o en averías del sistema. Por tanto constituyen los requisitos mínimos que debe cumplir cualquier sistema y que, por tanto, deben ser respetados independientemente del emplazamiento geográfico del sistema de bombeo.

Los criterios Recomendados (R) son aquellos que normalmente permiten una optimización del sistema. La mayor parte de ellos son universalmente aplicables, y una falta de su cumplimiento puede provocar, en última instancia, un aumento del coste de los sistemas. Por tanto, y visto que las consideraciones económicas dependen de las condiciones locales, la aplicación de estos criterios debe ser función de cada caso particular.

Los criterios Sugeridos (S) son aquellos que persiguen una instalación robusta. No obstante, hay que señalar que la calidad y solidez de los sistemas son muchas veces apreciaciones personales fruto de la experiencia de los autores y, por tanto, conllevan cierto grado de subjetividad. Los criterios propuestos aquí, pueden ser tamizados por la experiencia de los promotores de los proyectos y las particularidades del emplazamiento final, y su aplicación debe, en consecuencia, ser revisada en cada caso particular.

Los símbolos, “O”, “R”, “S”, son utilizados en el resto del capítulo para especificar el carácter obligatorio, recomendado o sugerido de cada criterio, según la clasificación mencionada anteriormente.

Asimismo se ha escogido una nomenclatura para designar cada una de las normas que se proponen en este capítulo con el objetivo de referenciarlas en otras partes de esta tesis de una manera clara y rápida. Esta convención consta de una o varias letras en mayúscula, indicando las partes o funcionalidad del sistema que abarca (por ejemplo , “M” para las asignadas a la motobomba, o “PT” para las que lo son a las protecciones) y un número de orden dentro de cada grupo definido por la o las letras que le preceden (M1, M2, P1, etc). En el capítulo 4, en donde se detallan los procedimientos propuestos para la verificación de estas normas, quedará manifiesta la utilidad de esta nomenclatura.

Las claves utilizadas y las partes o funciones a que corresponden son:

- “CO”: consumo de agua.
- “I”: irradiancia.
- “B”: bombeo o la fuente de agua.
- “G”: generador fotovoltaico.
- “E”: estructura soporte del generador.
- “C”: convertidor de frecuencia o inversor DC/AC.
- “M”: Motobomba.
- “CAB”: Cableado.
- “IH”: infraestructuras hidráulicas.
- “P”: Sistema de potabilización de agua.
- “PT”: Protecciones.
- “INS”: Aspectos generales de la instalación

## 2.2. Funcionamiento y especificaciones de sistemas de bombeo fotovoltaico

Desde un punto de vista general los sistemas de bombeo están compuestos de las partes siguientes:

- Un *generador fotovoltaico*, compuesto a su vez, de módulos interconectados eléctricamente hasta constituir una unidad de producción DC, y de una estructura soporte.
- Un *acondicionador de potencia*, constituido por un convertidor DC/AC, capaz de variar la frecuencia y la tensión de salida en función de la potencia disponible del generador , que a su vez, es función de la irradiancia incidente.
- Una *motobomba* (sumergida o no), formada por la asociación de un motor eléctrico de inducción y de una bomba, centrífuga o de desplazamiento positivo.
- Un *cableado eléctrico* a través del cual circula la energía desde el generador fotovoltaico hasta el motor, y que incorpora funciones de control y seguridad.

- Una *infraestructura hidráulica* que conduce el agua desde la fuente, normalmente un pozo, hasta los puntos de distribución y que, a su vez, está constituida por cuatro elementos: la fuente de agua, la conducción entre la fuente y la entrada al depósito de almacenamiento, el depósito y la conducción entre el depósito y los puntos de distribución. En esta definición, se entiende por conducción el conjunto de tuberías, accesorios (llaves de paso, empalmes, etc), dispositivos de medida y de la interfase con el usuario: grifos, fuentes, etc.
- Un *sistema de potabilización de agua*, allí en donde las condiciones sanitarias del agua lo hagan necesario.

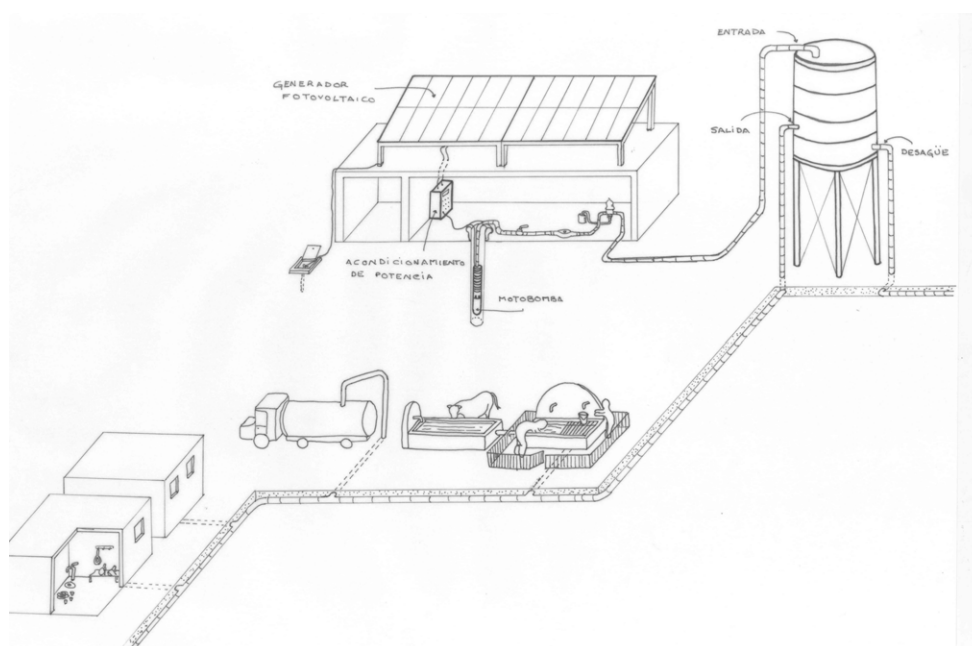


Figura 1: Partes principales de un sistema de bombeo fotovoltaico

La mayor parte de las bombas fotovoltaicas actuales, destinadas al suministro de agua potable a las poblaciones rurales, responden a este esquema, y su gama de funcionamiento cubre el rango que va desde los 200 m<sup>4</sup> hasta superar los 1.000 m<sup>4</sup> (unidad que representa un volumen de agua, medido en metros cúbicos, elevado a cierta altura medida en metros) al día<sup>38</sup>. Otras configuraciones (bombas no sumergidas, baterías, bombas de golpe de ariete, etc) son igualmente posibles, y están presentes en ciertos sectores del mercado, principalmente cuando los volúmenes de agua a bombear son pequeños: casas individuales, por ejemplo. Aunque no sean consideradas aquí en detalle, se entiende que la filosofía que rige estas configuraciones responde a los mismos principios considerados en este trabajo, y en consecuencia, la deducción de las especificaciones concretas resultarán de aplicación inmediata también en estos casos. En particular, para las gamas de aplicación de entre 50 y 400 m<sup>4</sup> al día, el mercado ofrece algunos buenos sistemas de bombeo con motores que funcionan directamente en DC. En estos casos, se podrán aplicar estas especificaciones sin más que sustituir el término convertidor DC/AC por convertidor DC/DC.

Recientemente, la gama de bombas sumergidas se ha ampliado con las comúnmente llamadas bombas helicoidales o de desplazamiento positivo. Más concretamente cuando se trata de grandes alturas de bombeo, del orden de cientos de metros y, al mismo tiempo, volúmenes diarios de agua reducidos, inferiores a 20 m<sup>3</sup>, el rendimiento de este tipo de bombas es significativamente más elevado que el de las bombas centrífugas equivalentes. Diversos estudios han detectado el interés de estas bombas para los casos de pueblos con niveles freáticos profundos y poblaciones de menos de 300 habitantes<sup>39</sup>. En estos casos hay que afrontar el alumbramiento del pozo y la construcción de infraestructuras en esas condiciones particulares, lo que se traduce, en un precio elevado del agua bombeada. Por otro lado, no hay que olvidar que este tipo de bombas requieren una potencia elevada de arranque.

El éxito de un sistema de suministro de agua debe ser juzgado basándose en los siguientes criterios:

- Capacidad de bombeo
- Fiabilidad
- Seguridad
- Sencillez de uso
- Sencillez de instalación y mantenimiento
- Calidad sanitaria del agua

El orden de esta lista no pretende establecer un orden de importancia. Este estudio se inclina sobre las implicaciones de cada uno de estos criterios, buscando deducir las especificaciones técnicas concretas, que pueden ser incorporadas directamente en los procedimientos que regulan la adquisición e instalación de los equipos. En varios casos, una especificación particular puede derivar de criterios variados y distintos. Por ejemplo, las especificaciones destinadas a evitar las pérdidas de agua o la corrosión en las tuberías afectan la fiabilidad, pero también a la sencillez del mantenimiento y la calidad sanitaria del agua. En estos casos, y por no alargar más el discurso, de los criterios afectados se mencionará en el texto solamente el primero. En el ejemplo mencionado, se referiría solamente el criterio de fiabilidad.

Se podrían haber considerado otros criterios para clasificar las normas, por ejemplo, atendiendo a los procedimientos de ensayo necesarios para su comprobación, de especial utilidad en los procesos reales de control de calidad. Por el interés que tiene desde el punto de vista expositivo, aquí continuaremos con el propuesto inicialmente, mientras que en el capítulo 4, en el que se profundizará en los ensayos de control de calidad, adoptaremos este segundo criterio de clasificación.

### **2.2.1. Capacidad de bombeo**

La demanda de agua, la irradiación solar y la altura de bombeo, son los datos que deben de ponerse a disposición del diseñador del sistema de bombeo fotovoltaico. Hay que insistir en el hecho de que los valores estimados de estos parámetros no son más que

predicciones, que inevitablemente llevan asociadas un cierto grado de incertidumbre. Esta incertidumbre es comúnmente asumida, y representa una seria limitación a la precisión de los resultados obtenidos de cualquier ejercicio de dimensionado.

### **2.2.1.1. Consumo de agua**

Para estimar el consumo de agua de poblaciones rurales, la literatura recomienda un valor situado entre 20 y 40 litros por persona y día. Sin embargo, el contraste experimental de esta práctica es escasa y poco concluyente. Las pocas medidas reales publicadas revelan que, incluso para dos lugares aparentemente idénticos (misma región, misma forma de vida, etc) la utilización del agua bombeada por un sistema fotovoltaico puede responder a patrones muy diferentes. En estas condiciones de semejanza, se han encontrado factores de utilización de agua (relación entre el volumen de agua consumido y el disponible) que van del 30 al 70 por ciento<sup>40</sup>.

En el caso de lo que ha sido observado en Marruecos<sup>40</sup> se puede diferenciar entre la parte de agua utilizada para el consumo humano (cocinar, beber, etc), estimado en 15 litros por persona y día, y la parte dedicada otros usos domésticos (aseo personal, lavado de ropa, consumo de animales domésticos, etc) estimado en 35 litros por persona y por día. Aunque repartiendo de distinta manera el agua asignada a cada necesidad básica, otros autores llegan a la misma cifra total (50 litros por persona y día) tras estudios más genéricos<sup>41</sup>. La cantidad diaria de agua que deberá suministrar la bomba resulta de sumar el primer término más el segundo multiplicado por un factor modulador que depende de la facilidad de acceso al punto de suministro de agua.

A título de hipótesis, para el dimensionado de los sistemas, se utilizará el intervalo que va entre los 15 y los 50 litros de agua por persona y día. El límite inferior corresponde a las situaciones para las cuales el agua es distribuida a través de fuentes comunales, lo que supone un esfuerzo no desdeñable por parte de las personas, mientras que el límite superior corresponde a situaciones en las que hay un punto de suministro de agua en cada casa<sup>40</sup>.

Al mismo tiempo que se considera esta hipótesis a la hora de dimensionar el sistema, hay que tener en cuenta también las particularidades de cada pueblo (disponibilidad de otras fuentes de agua, tradiciones, etc) y, dado que estas particularidades no son conocidas a priori, el diseñador está obligado a decidir sabiendo que va a tener cierto margen de incertidumbre. Nuestro consejo es elegir unos valores elevados que permitan tener en cuenta el aumento del número de habitantes del pueblo o el cambio en los perfiles de consumo. Por todo ello se aconseja lo que sigue:

**CO1. Si el suministro de agua a la población se efectúa a través de fuentes comunes, el valor del volumen de agua para el cálculo del dimensionado del sistema debe ser de 20 litros por persona y día. (R)**

**CO2. Si el suministro de agua a la población se efectúa a través de grifos individuales en cada casa, el valor del volumen de agua para el dimensionado deberá ser de 45 litros por persona y día. (R)**

En particular, cuando se trata de sistemas de alimentación comunitarios, y si además existen otras fuentes alternativas, estas recomendaciones tenderán a un cierto sobredimensionado de la bomba, es decir, a situaciones en las que la utilización real del agua es inferior a la capacidad del sistema de bombeo. Esta tendencia acarreará un cierto sobrecoste económico, pero evitará el riesgo contrario, es decir, el subdimensionado de la infraestructura, ante el cual las poblaciones son muy sensibles. Es importante recordar que el coste de un sistema de bombeo fotovoltaico está lejos de ser lineal con su tamaño y que el generador tan solo representa una pequeña parte en el coste del sistema completo (un 17% en el caso del programa llevado a cabo en Marruecos)<sup>40</sup>.

### 2.2.1.2. Irradiación solar

La estimación de un valor de referencia para la irradiación solar incidente sobre la superficie de un generador añade aún más incertidumbre en la concepción de una bomba fotovoltaica. De acuerdo con su naturaleza aleatoria, la irradiancia se caracteriza por un valor medio  $G_d(I)$ , representativo de su potencial total y por una desviación estándar  $\sigma_d$ , representativa de su variabilidad. Para un lugar dado, estos valores pueden ser obtenidos tomando datos durante un período de tiempo suficientemente largo para que sean estadísticamente representativos. A partir de estos valores, se puede predecir la evolución futura de la irradiación. Para asegurar una predicción con una probabilidad del 95%, es necesario considerar un margen de variación de  $G_d(I) \pm 2\sigma_d$ . En general, los valores medios mensuales de irradiación diaria horizontal,  $G_d(0)$ , están ampliamente disponibles, a diferencia de lo que ocurre con los de la desviación. Además, los métodos para estimar el valor de  $G_d(I)$  a partir de  $G_d(0)$  son bien conocidos<sup>42</sup>. Un ejemplo ayudará mejor a comprender esta situación: En la tabla 1 se muestran las medias mensuales de la irradiación horizontal observadas en Madrid para el mes de marzo entre los años 1986 y 1993 (en kWh/m<sup>2</sup>):

<b>1986</b>	<b>1987</b>	<b>1988</b>	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>
3'78	4'32	4'48	4'40	4'15	3'92	4'55	4'5

Tabla 1: Irradiaciones (kWh/m<sup>2</sup>) registradas en Madrid en los meses de Marzo de los años 1986 a 1993 en Madrid.

A partir de estos datos, se puede caracterizar un mes de marzo genérico mediante el valor medio de irradiación,  $G_d(0) = 4'26$  kWh y la desviación típica,  $\sigma_d = 0'27$  kWh. Esto supone que para cualquier mes de marzo del futuro, si se desea predecir la irradiación con una probabilidad del 95% hay que dar a la predicción un margen entre  $4'26 + 2 \cdot 0'27 = 4'8$  kWh/m<sup>2</sup> y  $4'26 - 2 \cdot 0'27 = 3'72$  kWh/m<sup>2</sup>, es decir un  $\pm 12'7\%$  alrededor del valor medio.

Sin embargo, el reconocimiento de la incertidumbre asociada no elimina la necesidad de dar un valor de referencia para el diseño del sistema. Esta necesidad es doble, por un lado es necesario para calcular el tamaño del sistema de bombeo, y por otro, la comprobación de la capacidad de bombeo del sistema exige fijar las condiciones de referencia de radiación en las que dicho sistema debe entregar cierto servicio.

Nuestra propia experiencia en Marruecos indica que el consumo de agua varía de forma significativa a lo largo del año, y que el mes más desfavorable, a tener en cuenta para el diseño del sistema, corresponde a la época más seca, el verano, como era fácil de preveer. En la mayoría de los casos, es útil recurrir a la recomendación siguiente:

**I1. El valor de la irradiación diaria incidente sobre la superficie del generador para el diseño debe estar situada entre 5 y 7 kWh/m<sup>2</sup>. El valor central de este margen, es decir, 6 kWh/m<sup>2</sup> esta especialmente aconsejado.**(S)

Por otro lado, el rendimiento instantáneo de la cadena de bombeo varía con la irradiancia. Por ello, las especificaciones de un sistema de bombeo requieren la consideración, no solamente de la irradiación total disponible, sino de un perfil de distribución de la irradiancia a lo largo del día,  $G(t)$ . La norma IEC 61725 describe una formulación analítica particularmente conveniente, que permite sintetizar el perfil de irradiancia a partir de los valores de irradiación diaria  $G_d$ , de la irradiancia máxima  $G_{MAX}$ , y la duración del día,  $S_d$ . La comparación de los perfiles descritos en esta norma a partir de una larga colección de días reales conduce a recomendar para estos parámetros los valores de la tabla 2:

$G_d$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$G_{MAX}$ (W/m <sup>2</sup> )	$S_d$ (horas)
7	1.035	12
6	1.000	11
5	830	10
4	675	9
3	575	8

Tabla 2: Valores recomendados para los parámetros considerados en el IEC 61725

Por ello se propone lo que sigue:

**I2. Para el dimensionado se considerará el perfil diario de irradiancia descrito en la norma IEC 61725 para los valores de la tabla 2.**(S)

### 2.2.2. La fuente de agua: altura de bombeo y capacidad de suministro

Las principales fuentes de agua en el medio rural son los sondeos y los pozos tradicionales. Para el propósito que nos ocupa, la diferencia entre estas dos fuentes de agua descansa en la capacidad de almacenamiento. Los sondeos, que son siempre estrechos (diámetro típicamente inferior a 30 cm), no permiten acumular agua en su interior. En consecuencia, el caudal extraído proviene del agua percolada a través de sus paredes. Por el contrario, los pozos tradicionales son siempre más grandes (diámetros de 2 metros normalmente), y por tanto pueden acumular cantidades de agua significativas en su interior.

El comportamiento dinámico de los sondeos es tal que, la profundidad del agua se

incrementa cuando el caudal extraído aumenta. La apertura de un sondeo debe ser seguida de un ensayo de caracterización que permita establecer tres valores: la profundidad o nivel estático,  $H_{ST}$ , correspondiente a un caudal nulo, la profundidad dinámica,  $H_{DT}$ , correspondiente a la profundidad utilizada en el ensayo, y el valor del caudal de ensayo,  $Q_T$  (ver figura 2). En todo lo que sigue se entiende que las profundidades son distancias desde el nivel del agua hasta el borde del pozo (brocal, o borde sin más).

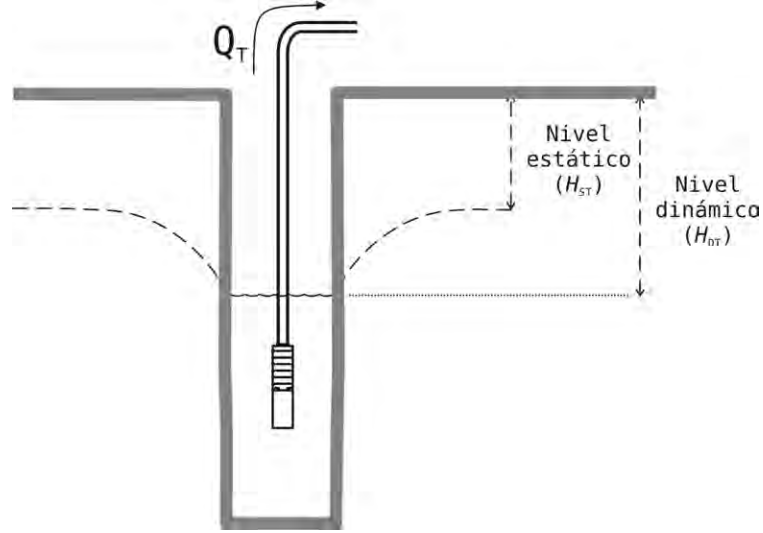


Figura 2: Dinámica de un sondeo

La naturaleza del bombeo fotovoltaico hace que el caudal extraído del pozo varíe dentro de cierto margen a lo largo del día. Lógicamente, cuanto más grande sea el volumen diario de agua bombeada, más grande será el margen de caudales, y en consecuencia, más grande también será la variación de la altura total de bombeo. Para un pozo, un sistema de bombeo y un día determinado, se puede definir una altura total de bombeo equivalente,  $H_{TE}$ , correspondiente a un pozo hipotético en el que la altura no varía con el caudal, y a partir del cual la bomba extraerá el mismo volumen de agua a lo largo del día. Se puede, entonces, estimar el valor de  $H_{TE}$  a través de la fórmula empírica siguiente<sup>43</sup>:

$$H_{TE} = H_{OT} + H_{ST} + \frac{(H_{DT} - H_{ST})}{Q_T} Q_{AP} + H_E(Q_{AP})$$

con  $Q_{AP} = \alpha Q_d$ , y donde  $\alpha = 0,047$  cuando  $Q_d$  está expresado en metros cúbicos.  $H_{OT}$  es la altura vertical a partir de la salida de agua hasta el suelo, y  $H_E(Q_{AP})$  son las pérdidas de carga correspondientes a  $Q_{AP}$ . Hay que hacer notar que  $Q_{AP}$ , llamado “caudal aparente”, es un caudal medio.

Se puede observar, como es previsible, que el valor de  $H_{TE}$  aumenta a medida que el volumen diario extraído  $Q_d$  aumenta, y el caudal del pozo  $Q_T$  (o dicho de otro modo, la capacidad del pozo de reponer agua), disminuye.

En el momento de elegir una bomba fotovoltaica, es cómodo recurrir al valor  $H_{TE}$ , ya



que, por un lado facilita la tarea del diseñador, y por otro, hace válidos ensayos de laboratorio realizados a altura constante, en el marco de posibles mecanismos de control de calidad de sistemas de bombeo.

Aparte de esto, está claro que la capacidad máxima del pozo no debe jamás ser sobrepasada por el sistema de bombeo fotovoltaico. Lo cual nos conduce a un criterio importante:

**B1. Cuando el bombeo es realizado a partir de sondeos (no pozos tradicionales), el caudal correspondiente al generador funcionando en las condiciones estándar de medida (irradiancia=1000W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula = 25°C) debe ser menor que el valor del caudal de caracterización del sondeo. (O)**

En lo referente a pozos tradicionales, ni sus características, ni los tipos de bombeo disponibles están estandarizados. Mientras, éstas fuentes de agua representan a menudo la mejor alternativa para el suministro de agua a un pueblo. A la hora de elegir una bomba, solo el valor de  $H_{TE}$  puede ser suficiente para caracterizar el pozo. El lector debe considerarse advertido también de que la sequía ha sido señalada, con frecuencia, como motivo de parada de un buen número de sistemas de bombeo fotovoltaico. Este problema ha sido encontrado también en Marruecos<sup>44</sup>. Por tanto, no estará de más incluir este hecho en el dimensionado en forma de recomendaciones de ahorro de agua a los usuarios del sistema.

Independientemente del régimen de lluvias o sequías, y relacionado también con los pozos artesanales, es importante destacar el hecho de que la instalación de una bomba fotovoltaica puede suponer una capacidad de bombeo apreciablemente superior a la disponible con el sistema de bombeo previo. Si se trata de una bomba manual, esta afirmación es obvia, pero incluso si la bomba anterior esta impulsada mediante un motor diesel, es muy probable que también sea cierta. Generalmente los sistemas diesel son más propicios a las paradas por averías o mantenimiento, de forma que, en término medio, el volumen de agua bombeado suele ser menor. Ante esta situación, aunque los usuarios del pozo manifiesten que éste nunca se seca, conviene reforzar la capacidad de almacenamiento del mismo. Por lo tanto:

**B2. Es recomendable aumentar la capacidad de los pozos artesanales que van a recibir una bomba fotovoltaica mediante su profundización y/o excavación de galerías laterales, hasta alcanzar un volumen diario de almacenamiento superior al de extracción diaria de la bomba. (R)**

### 2.2.2.1. Tamaño del generador fotovoltaico

Una vez conocido el volumen diario,  $Q_d$  (m<sup>3</sup>), la altura de bombeo equivalente,  $H_{TE}$  (m) y la irradiación diaria incidente sobre el plano del generador,  $G_d$  (kWh/m<sup>2</sup>), la potencia nominal correspondiente del generador fotovoltaico,  $P_G^*$ , es calculada teniendo en cuenta el rendimiento asociado a cada elemento en particular dentro del sistema total. No tiene ningún sentido especificar aquí un valor concreto para  $P_G^*$ . Sin embargo se considera interesante presentar un método cuya aplicación conduzca a una buena aproximación para este valor.

Si se supone que la tubería tiene un diámetro suficientemente grande, la velocidad del agua en el interior será despreciable, y por tanto, también lo serán las pérdidas de carga y la energía cinética de entrada del agua en el depósito. En estas condiciones, el balance energético de una bomba fotovoltaica puede ser establecido considerando que la energía hidráulica que ésta suministra,  $E_H$ , es igual a la energía potencial ganada por el agua,  $E_{POT}$ . Siendo, entonces válida la expresión siguiente:

$$G_d \frac{P^*}{G} \frac{\eta_g}{\eta_g^*} \eta_I \eta_{MB} = \rho Q_d g H_{TE}$$

donde  $\eta_g$ ,  $\eta_I$  y  $\eta_{MB}$  son respectivamente los rendimientos diarios del generador, del inversor y de la motobomba,  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del agua y  $g=9.8 \text{ m/s}^2$  la aceleración de la gravedad. Una aproximación razonable, para los generadores de silicio monocristalino y las bombas centrífugas consiste en suponer los valores siguientes:

$\frac{\eta_g}{\eta_g^*} = 0.86$ ,  $\eta_I = 0.9$ ;  $\eta_{MP} = 0.35$ . Hay que destacar que la relación  $\frac{\eta_g}{\eta_g^*}$  incluye pérdidas de energía debidas a: temperatura de trabajo de las células superior a  $25^\circ\text{C}$ , irradiancias incidentes menores de cierta cantidad (aprox.  $200 \text{ W/m}^2$ ), ángulos de incidencia distintos de los óptimos y existencia de suciedad sobre los módulos.

Se llega por tanto a:

$$P^*(W) = 10 \frac{G}{G_d} Q_d (m^3) H_{TE} (m)$$

Además de su simplicidad, esta expresión conduce a resultados satisfactorios. Un estudio de la GTZ<sup>45</sup> sobre un buen número de bombas fotovoltaicas instaladas en sus proyectos de cooperación al desarrollo encontró, de hecho, que esta expresión conducía generalmente a mejores resultados que las deducidas a partir de herramientas gráficas suministradas por los fabricantes.

Como ejemplo ilustrativo, supóngase un sondeo con las características siguientes:  $Q_T = 5.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H_{ST} = 5 \text{ m}$  y  $H_{DT} = 32 \text{ m}$ . Se equipa con una bomba fotovoltaica capaz de suministrar  $30 \text{ m}^3$  al día cuando la irradiación diaria global incidente es de  $6 \text{ kWh/m}^2$ . Se sabe también que el agua bombeada será almacenada en un depósito situado a 7 metros de la superficie. Los cálculos son:

$$H_{TE} = 7 + 5 + \frac{32}{5.2} \cdot 0.047 \cdot 30 = 19.3 \text{ m}$$

Suponiendo una bomba centrífuga típica, la potencia nominal aproximada del generador fotovoltaico será:

$$P^* = \frac{10}{6} \cdot 30 \cdot 19.3 = 965 \text{ W}$$

### 2.2.3. Fiabilidad

La fiabilidad de los sistemas de bombeo, en el sentido de ausencia de averías, depende, no solo de la fiabilidad de los componentes, sino también de otros aspectos como la capacidad de la fuente de agua, la calidad de la instalación, etc. Cada componente debe satisfacer los mismos criterios de fiabilidad, porque su integración en el sistema hace que la avería de uno de ellos repercuta en la calidad del conjunto.

La fiabilidad debe ser entendida aquí como referida a la disponibilidad de agua. El matiz es importante, porque a la calidad intrínseca de los elementos se unen las condiciones particulares del lugar en el que trabajan en el desempeño final del sistema. Por ejemplo, un grifo de buena calidad que no está disponible en el mercado local, puede resultar menos fiable que otro de menor calidad pero que es fácilmente localizable, y por tanto sustituible. Las consecuencias de una avería en el primer caso, en términos de disponibilidad de agua, son peores que en el segundo.

#### 2.2.3.1. Generador fotovoltaico

**G1. Los módulos fotovoltaicos deben estar certificados de acuerdo con la norma internacional IEC-61215, o la norma específica aplicada en el país correspondiente. (O)**

Hasta el momento, este criterio excluye los módulos fotovoltaicos de película delgada. La fiabilidad de esta tecnología está sujeta a debate generalizado. Existen normas específicas para ella (IEC-61646) y su utilización está aceptada en algunos proyectos de electrificación rural apoyados por el Banco Mundial<sup>46</sup>. Sin embargo, la experiencia práctica con esta tecnología no es aún concluyente, y aconseja tomarla con precaución. En el caso concreto de los sistemas de bombeo, el peso de los módulos fotovoltaicos en el coste total de los sistemas no es importante (17% en el caso de los proyectos llevados a cabo en Marruecos con respecto al coste total de los sistemas ya instalados sin incluir el coste de los depósitos e infraestructuras de distribución<sup>40</sup>) y, en consecuencia, no parece tener sentido asumir riesgos importantes a cambio de una reducción del precio, que en el conjunto de los sistemas, es bastante modesta.

La tensión continua de funcionamiento de los sistemas de bombeo es con frecuencia elevada, normalmente más de 120 voltios, lo que hace importantes los peligros de averías en caso de sombreamiento parcial de los módulos, requiriendo una protección específica. Afortunadamente, la mayoría de los fabricantes incluyen sistemáticamente diodos de “by-pass” destinados precisamente a esta protección en todos los módulos fotovoltaicos: Por lo tanto:

**G2. Los módulos fotovoltaicos deben estar protegidos con diodos de “by-pass” contra el fenómeno del punto caliente. (O)**

En general los generadores fotovoltaicos están constituidos por una asociación de varias ramas en paralelo, cada una de ellas constituida por la asociación de módulos conectados en serie. En circunstancias anormales, la ocurrencia de una corriente inversa es posible, y varios diseñadores incluyen un diodo antiretorno en cada rama como medida de protección

contra este fenómeno. Sin embargo, este fenómeno es extremadamente improbable, y además, hay evidencias de que los módulos pueden soportar sin daño alguno corrientes inversas hasta cinco veces la corriente de cortocircuito en condiciones estándar,  $I_{SC,m}^*$ . Son varios los autores<sup>47, 48</sup> que piensan que son más las desventajas que las ventajas de tales diodos. Es por ello que son poco recomendados. En su lugar, es mejor recurrir a un fusible en el extremo de cada rama, capaz de soportar una corriente de 2 a 4 veces el valor de  $I_{SC,m}^*$ . Un fusible adicional en el extremo opuesto es también una manera fácil y cómoda de aislar la rama completamente del resto del generador, lo cual es útil para el mantenimiento en general y para la detección de posibles fallos de aislamiento en particular.

Por consiguiente:

**G3. Los generadores fotovoltaicos constituidos por 5 ramas o más conectadas en paralelo deben estar protegidas contra el fenómeno de corriente inversa (O)**

**G4. La protección a base de fusibles, capaces de soportar una corriente de 2 a 4 veces la corriente de cortocircuito del módulo en condiciones estándar, esta particularmente recomendada (R)**

Por otro lado:

**E1. Las estructuras soporte deben ser capaces de resistir durante al menos ,10 años, las condiciones de intemperie sin corrosión ni fatigas importantes. (O)**

**E2. Las estructuras soporte deben resistir vientos de más de 120 km/h. (R)**

Varios materiales han demostrado ya su idoneidad: acero inoxidable, aluminio, acero galvanizado, madera tratada, etc.

**G5. En el caso de módulos fotovoltaicos con marco metálico, el conjunto de la tornillería y los elementos de fijación deben ser exclusivamente de acero inoxidable. (O)**

Es importante mencionar que los módulos sin marco, pegados directamente a una estructura soporte mediante un adhesivo adecuado, aunque poco utilizados en el mercado actual de bombeo fotovoltaico han dado a menudo pruebas de buen funcionamiento en otros sectores del mercado fotovoltaico en general, y pueden ser aceptados aquí.

Los mismos requerimientos referidos a los módulos de capa delgada, se aplican también a los sistemas solares con seguimiento: la mejora en energía conseguida (en términos de agua bombeada) está entre el 30 y 50%, pero el mismo resultado puede ser conseguido aumentando en las mismas proporciones la potencia nominal del generador fotovoltaico. De nuevo, la repercusión de este aumento de potencia es de poca importancia en comparación con el coste total del sistema de bombeo, y no justifica los riesgos adicionales que el seguimiento conlleva (mantenimiento de motores, sistemas de control del seguimiento, etc). Por ello, y aún sabiendo que existen en el mercado sistemas con seguimiento con buenos resultados, declaramos que:

**E3. Las estructuras soporte fijas son preferibles a las que realizan seguimiento del.**

**sol (en uno o dos ejes). (S)**

Desafortunadamente, el robo de módulos florece allí donde se desarrolla el mercado fotovoltaico. Y es también mencionado como causa de avería en sistemas de bombeo de este tipo. Por ello merece la pena luchar contra este problema con los medios que ofrezca el mercado en cada caso: vigilancia personal, dispositivos antirrobo, cerramientos específicos, etc. Por tanto:

**G6. El diseño del generador fotovoltaico debe considerar sistemas de protección contra el robo (S)**

La orientación y el ángulo de inclinación de la estructura soporte debe permitir la optimización de la energía incidente sobre el generador durante el mes más desfavorable del año, es decir durante el mes que presente la relación menor entre la irradiación y la demanda, es decir:

**E4. La orientación debe ser al norte en el hemisferio sur y al sur en el hemisferio norte. (O)**

Generalmente, el mes más desfavorable corresponde al mes más caluroso y coincide con el verano. Se puede utilizar la fórmula siguiente para la selección del ángulo de orientación:

**E5. Inclinación =  $\max \{10^\circ, [\text{abs}(\text{latitud}) - 10^\circ]\}$ . (R)**

donde la latitud se expresa en grados. Esta expresión considera un mínimo de  $10^\circ$ , que es lo suficiente para permitir la limpieza realizada por el agua de lluvia. Hay que insistir en el hecho de que ligeras desviaciones de la inclinación ( $\pm 10^\circ$ ) con respecto a sus valores óptimos tienen incidencias mínimas en lo referente a la generación de energía resultante, y deben ser tolerados como norma general. Las sombras, sin embargo, pueden llegar a tener un efecto nefasto, y por tanto hay que poner especial atención para evitarlas. Por ello:

**G7. Los generadores fotovoltaicos deben estar totalmente libres de sombras en el intervalo de 8 horas centrado en el medio día solar. (R)**

### **2.2.3.2. Convertidor de frecuencia**

Este elemento sirve, principalmente, para transformar la corriente que suministra el generador fotovoltaico en corriente alterna, necesaria para alimentar los motores de inducción. Además, el convertidor puede incorporar funciones de protección ante situaciones anormales: nivel bajo de agua en la fuente de agua, desbordamiento del depósito, ausencia de insolación sobre el generador, etc.

En lo que respecta al generador fotovoltaico, el funcionamiento del convertidor debe ser tal que la tensión DC de trabajo que impone a su entrada sea la más próxima a la tensión en el punto de máxima potencia del generador teniendo en cuenta su variación debida a la temperatura. De hecho, son numerosos los convertidores que incorporan esta función. Mientras, hay que hacer notar que la alternativa de funcionar a tensión DC constante es factible, ya que las pérdidas, en comparación, son débiles cuando la tensión es

convenientemente elegida. La figura 3 muestra el menor suministro de agua asociado al funcionamiento a tensión DC constante comparado con uno en el que la tensión DC sigue continuamente a la de máxima potencia. La simulación esta hecha con datos de irradiancia horizontal y temperatura ambiente correspondientes al año 2005. Se han utilizado datos medios horarios de las dos magnitudes para todos los días del año. En el eje de las abscisas se representa la tensión de trabajo en términos porcentuales respecto de la de máxima potencia en condiciones estándar, y en el de las ordenadas el volumen total anual de agua bombeado para cada tensión de trabajo. Los puntos azules representan el volumen de agua bombeado si se sigue el punto de máxima potencia (se repite en cada simulación para una mejor comparación visual). Los puntos rojos son los distintos suministros resultantes de trabajar a tensiones distintas de la de máxima potencia en condiciones estándar. Se puede observar que eligiendo adecuadamente la tensión de trabajo, las pérdidas esperables no son de consideración. Según este resultado se tiene una pérdida del 6 % para un margen de tensiones, que, en el caso puesto para ilustrar esta discusión, está en el entorno del 10 %

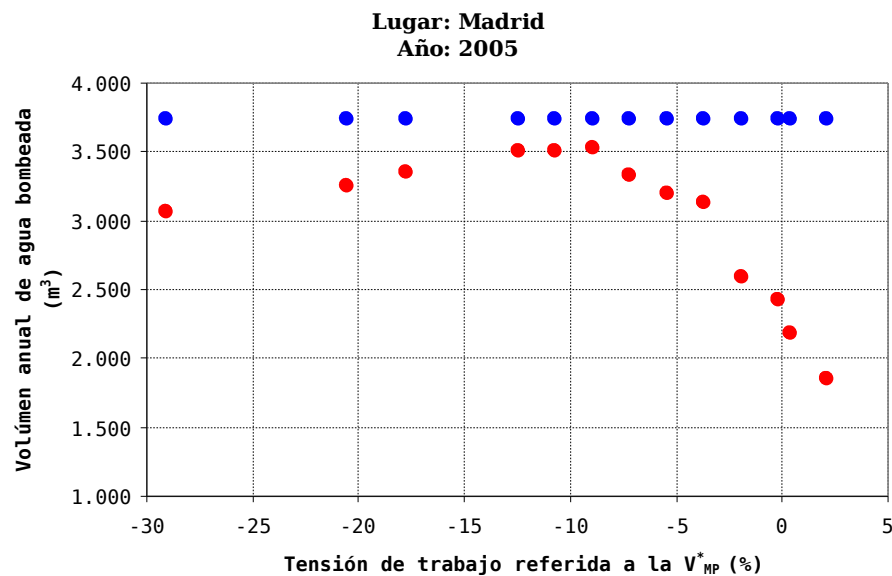


Figura 3: Estimación de las pérdidas en volumen de agua bombeada si se hace trabajar al convertidor en tensión DC constante respecto al funcionamiento con seguimiento del punto de máxima potencia. Los cálculos están realizados a partir de datos meteorológicos (irradiancia horizontal y temperatura ambiente) medidos en Madrid.

por debajo de la tensión de máxima potencia en condiciones estándar. La climatología del lugar es la que va a dictar la tensión correcta de trabajo.

Por ello:

**C7. El funcionamiento en el punto de potencia máxima es preferible, sin embargo el de tensión constante es también aceptable (S).**

En principio, es posible especificar un margen recomendable de pérdidas energéticas

asociadas al funcionamiento en modo distinto del seguimiento del punto de máxima potencia. Por tanto, estimamos preferible considerarlos en la capacidad del sistema de bombeo en su conjunto, que ya ha sido considerado en el apartado 2.1 “Capacidad de bombeo”. En otras palabras, es preferible especificar únicamente en términos de agua a suministrar, y permitir al proponente del sistema que sea libre de elegir la solución técnica que considere más oportuna en cada caso.

Por otro lado, el convertidor DC/AC debe adaptar la corriente AC que suministra a su salida a las características del tipo de bomba. Las bombas actuales, de las que las centrífugas representan un porcentaje mayoritario, se caracterizan por una altura dada. El par mecánico desarrollado por la bomba está relacionado directamente con el cuadrado de su velocidad de rotación, que, a su vez, está directamente ligado a la frecuencia de alimentación del motor. Además, el par mecánico que suministra un motor de inducción es directamente proporcional al cuadrado de la relación entre la frecuencia y la tensión ( $T_M \sim (V/f)^2$ ). Sea como fuere, el convertidor DC/AC debe ajustar la tensión y la frecuencia a la salida de manera tal que se mantenga constante la relación ( $V \sim f^2$ ). Estas observaciones son evidentes y no precisan de ninguna especificación particular.

La ocurrencia de situaciones anormales no puede jamás ser excluida totalmente en el funcionamiento de los sistemas de bombeo fotovoltaico. Resulta cómodo incorporar protecciones necesarias en la propia electrónica de los convertidores DC/AC, motivo de discusión en este apartado. La situación potencialmente más peligrosa, corresponde a la falta de agua en la fuente (pozo, sondeo, etc). Cuando, por la razón que sea, el nivel de agua llega a la entrada de aspiración de la bomba, ésta empieza a extraer una mezcla de aire y agua. Ese fenómeno es denominado cavitación. Una bomba que cavita puede averiarse rápidamente por exceso de vibración o por exceso de calor. Además, la superficie interior del pozo por debajo de la capa freática puede llegar a deteriorarse a causa de los vacíos provocados en el pozo.

Una protección ante esta eventualidad, puede conseguirse midiendo directamente el nivel de agua en el pozo con la ayuda de un sensor de nivel que da una orden de parada al convertidor cuando el agua desciende por debajo de cierto nivel determinado. Sin embargo, la experiencia con estos sensores nos ha mostrado que en unos casos, su instalación es difícil, y que en otros, su fiabilidad no es suficiente. Por ello, es más recomendable seguir el funcionamiento propiamente dicho de la bomba. La densidad del aire es unas 1000 veces inferior a la del agua, y por esto, la entrada del aire en la bomba hace disminuir sensiblemente el peso de la columna de fluido entre la bomba y el depósito, y con ello la resistencia que se opone al movimiento del eje. Por tanto, el motor, liberado de carga, tenderá a girar más rápidamente y demandará al convertidor más corriente, que redundará en una frecuencia superior a la que le corresponde en su funcionamiento normal. La protección, por tanto, está basada en la parada de la bomba cuando cierto valor de frecuencia de trabajo de la bomba es superado. Por estas razones:

**C8. El sistema de bombeo debe estar protegido contra la eventualidad de falta de agua en la fuente, o, lo que es lo mismo, de la entrada de aire en la bomba. (O)**

**C9. La protección basada en la detección de un valor de frecuencia elevado es.**



**preferible a la protección basada en el nivel de agua en la fuente (pozo, sondeo, etc).**  
**(S)**

Por otro lado, e independientemente de la forma de protección adoptada, una vez que la bajada del nivel de agua provoca la parada de la bomba, ésta no deberá ser reanudada hasta que la recuperación del nivel de agua sea tal que permita de nuevo un bombeo continuo. Por ello, o bien se dispondrá de un segundo sensor de nivel de agua en el pozo que dé la orden de arranque cuando ésta le supere, o bien ésta orden se retrasará cierta cantidad de tiempo razonable que permita la recuperación del pozo. Una o dos horas pueden ser suficientes. Por lo tanto:

**C10. La protección de falta de agua en el pozo deberá incluir una temporización que asegure la recuperación del nivel de agua, antes de reanudar el bombeo. (O)**

La acumulación de materia en suspensión retenida en el agua, o la aspiración de cualquier elemento extraño (piedras, etc) puede ocasionar el bloqueo mecánico de la bomba y, por tanto el motor puede destruirse. Por ello:

**C11. El sistema de bombeo debe estar protegido contra el bloqueo mecánico de la bomba (O)**

El llenado completo del depósito es una situación frecuente en un sistema de bombeo bien dimensionado. Si no se toman las medidas adecuadas, el bombeo continuará y provocará un desbordamiento de agua en el depósito. A los daños que pueda ocasionar la distribución de agua sucia, se añade el impacto negativo contra una gestión racional de este precioso líquido. Este agua en exceso puede ser utilizada de varias maneras (fabricación de ladrillos que luego son secados al sol, abrevaje de ganado, irrigación de cultivos, etc) o incluso se la puede reconducir de nuevo al pozo. En cualquier caso hará falta el concurso de cierta infraestructura hidráulica. Asimismo, se puede parar el bombeo cuando el agua alcanza un cierto nivel en el depósito. Esta situación puede ser detectada, ya sea con la ayuda de sensor de nivel que conlleva los inconvenientes ya mencionados, o bien con la ayuda de un flotador que cierra la entrada de agua en el depósito cuando éste se llena. Al cerrarse, y continuar el bombeo, la presión en las tuberías aumentará. Si cerca de la bomba se instala un presostato tarado a la presión adecuada, cuando ésta se alcance, enviará la orden de parada a la bomba.

**C12. El sistema de bombeo debe estar protegido contra la eventualidad de desbordamiento de agua en el depósito de almacenamiento de agua. (O)**

**C13. Si la protección contra el desbordamiento de agua en el depósito se hace a través de la parada de la bomba, se debe incluir una temporización que asegure un vaciado razonable del depósito, antes de arrancar de nuevo el bombeo. (O)**

Es claro, que para asegurar tanto el bombeo de agua como el buen desempeño de las funciones de protección que se puedan incorporar, es necesario que el convertidor sea muy fiable y que esté protegido. Una primera consideración será que pueda manejar sin problemas toda la potencia suministrada por el generador fotovoltaico en los casos más extremos. De esta manera:

**C1. El convertidor debe resistir sin daños la operación en las condiciones siguientes: temperatura ambiente de trabajo 45°C, corriente DC de entrada igual al 125% de la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida, en toda la gama de tensiones DC de funcionamiento posibles. (O)**

**C2. El convertidor debe resistir sin daños la conexión a una tensión DC igual al 125% de la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida. (O)**

La circuitería del convertidor DC/AC deberá estar protegida ante los daños provocados por posibles impactos mecánicos, y ante los efectos adversos de la intemperie (polvo, humedad e insectos), y al mismo tiempo sus componentes deben estar suficientemente ventilados. Para asegurarlo

**C3. El convertidor debe estar protegido con un armario que asegure un grado de protección de, al menos, IP 3.2, según está definido en la norma IEC529. (O)**

La primera cifra de la referencia IP indica el grado de protección ante la entrada de cuerpos sólidos extraños (modelados mediante esferas de diámetros dados): en este caso el '3' indica la protección ante cuerpos sólidos de un diámetro superior a 2'5 mm (herramientas, cables, etc). La segunda cifra de la referencia IP indica el grado de protección ante la infiltración de agua, y el '2' indica que el equipo no debe ser dañado si es inclinado un ángulo del orden de  $\pm 15^\circ$  alrededor de su posición normal, y recibe agua cayendo verticalmente. El grado de protección IP 3.2 debe ser considerado como un mínimo indiscutible, aplicado solamente a los convertidores instalados en el interior de las habitaciones bien cerradas. Cuando sea posible, el grado de protección debe ser aumentado hasta conseguir evitar la entrada de objetos de 1 mm de diámetro y resistir la proyección de agua desde cualquier dirección. En todos los casos:

**C4. La Protección IP4.3 será indiscutible para los convertidores de frecuencia instalados en el exterior. (O)**

Los generadores fotovoltaicos implican la existencia de bucles conductores de gran tamaño, y aconseja observar aspectos relativos a las sobretensiones inducidas por descargas atmosféricas. En consecuencia:

**C5. El convertidor de frecuencia debe estar protegido ante sobretensiones inducidas a la entrada mediante la ayuda de un dispositivo de clase C, según está definido por la norma IEC 61024, situado entre cada uno de los polos (+ y -) aislado de tierra, y la tierra misma del sistema. La instalación de este dispositivo debe responder al estado del arte definido por la norma IEC 61024 (O)**

En general, los convertidores se instalan en la proximidad de la fuente de agua, por ello la longitud del cable que alimenta el motor de alterna es normalmente reducida. En consecuencia, las sobretensiones inducidas lo serán también, y no es necesario protegerse contra ellas de una manera específica. Sin embargo, esta protección puede ser también recomendada para algunos casos concretos, en los que la distancia del convertidor a la entrada del pozo sea superior a 20 metros, o cuando el sistema vaya a trabajar en zonas de alto riesgo de tormentas eléctricas. En este último caso, se puede prever una doble

protección mediante descargadores, situados, uno a la salida del convertidor y otra otra a la entrada del pozo.

Finalmente los convertidores que utilicen técnicas de modulación PWM pueden producir interferencias que afecten negativamente a radios, televisiones, etc, que se encuentren en sus proximidades. El carácter aislado, en términos eléctricos, de los sistemas de bombeo objeto de estas especificaciones, hace que la gravedad de este problema dependa más de la longitud del cable DC y AC, y de la proximidad de la bomba a las casas. Como regla general:

**C6. Los convertidores deben satisfacer los criterios de emisión de radiofrecuencias establecidos por la etiqueta CE. (R)**

### **2.2.3.3.Motobomba**

Tanto los motores de inducción como las bombas centrífugas son equipos bien estandarizados en el mercado eléctrico convencional, por ello las motobombas sumergidas, resultado de esta combinación, y también con larga tradición en los mercados, pueden ofrecer buenas relaciones calidad/precio. Sin embargo, cuando se trata de incorporarlas en un sistema de bombeo fotovoltaico, hay que restringir la elección a aquellas que sean de la mejor calidad (fabricadas en acero inoxidable, por ejemplo, entre otras características), ya que, de nuevo, el impacto económico de esta elección no es importante en el conjunto del coste del sistema, y por contra, las consecuencias humanas y económicas de una avería en este componente son particularmente desastrosas. Extraer una bomba de un pozo, por ejemplo, puede ser muy costoso en las condiciones de aislamiento (ausencia de electricidad, etc) que son frecuentes en esta aplicación. Otro ejemplo que apoya esta afirmación, es la resistencia a la corrosión. A menudo, la calidad del agua es poco conocida, y ello aconseja tomar la precaución de utilizar materiales resistentes a la corrosión.

En lo que concierne a las bombas de desplazamiento positivo, hay que considerar que, el eje que une el motor con la bomba, es especialmente largo, (alrededor de 30 cm) y que esta sometido a un estrés mecánico elevado, particularmente cuando la bomba arranca. Lo más frecuente, entre los problemas citados con este tipo de bomba, es la rotura del eje a causa de la corrosión. Por tanto, es especialmente importante analizar la compatibilidad entre el material del eje y la composición del agua a ser bombeada. Incluso si tal compatibilidad existe, merece la pena recordar que:

**M1. Todos los materiales del grupo motobomba deben ser resistentes a la corrosión del agua bombeada. (O)**

Además:

**M2. El sistema de bombeo debe soportar sin daño alguno, al menos 5.000 ciclos de arranque-parada en las condiciones de operación definidas por los siguientes 2 parámetros: una altura máxima de bombeo, y un generador fotovoltaico funcionando en condiciones estándar de medida. (O)**

La mejor manera de garantizar la estanqueidad de un motor es evitando abrirlo. Esto se aplica a los motores DC que, en el caso en que estén equipados con delgas, deben ser abiertos periódicamente para su sustitución. La experiencia nos enseña que, en las condiciones del terreno, esta operación ofrece pocas garantías y debe por tanto ser evitada. En consecuencia:

**M3. Los motores que operan directamente en DC, deben ser del tipo “sin colector de delgas” (R)**

En último lugar, las motobombas deben estar fijadas de manera que no caigan al fondo del pozo, que trabajen en la posición correcta, y que no resulte ningún inconveniente derivado del retroceso de la bomba en el arranque. Así, se puede utilizar una tubería capaz de soportar al mismo tiempo el peso de la bomba y el caudal de agua, o bien utilizar un cable adicional de acero, para fijar la motobomba a la cabeza del pozo. En todos los casos:

**M4. La fijación de la motobomba debe ser firme, asegurar una posición vertical, y soportar el retroceso en el arranque.(O)**

## **2.2.3.4.Cableado**

Además de soportar las condiciones de intemperie, el cableado deberá ser de una sección tal que las caídas de tensión que provoca no afecten significativamente al sistema. Las especificaciones siguientes le serán de aplicación:

**CAB1. La sección del cableado debe permitir limitar las pérdidas de tensión entre el generador y el convertidor a menos del 2%, y a menos del 3% entre el convertidor y la entrada al grupo motobomba. Esta especificación se aplica en condiciones de corriente máxima en funcionamiento, con el generador funcionando en condiciones estándar.**

Es importante hacer notar que esta especificación afecta a las pérdidas de tensión estrictamente asociadas al cableado (conductores y terminales de conexión). Las pérdidas internas en los elementos de protección (fusibles y diodos) o a los convertidores, son objeto de otras especificaciones.

A menudo, los sistemas de bombeo operan a tensiones relativamente altas, de alrededor de 120 voltios DC y de 220 voltios AC, y de corrientes relativamente bajas, menos de 30 amperios, y por ello las secciones resultantes tras aplicar la especificación anterior no son grandes. Los cables también deben soportar la fatiga mecánica, por lo que:

**CAB2. Sin perjuicio de lo especificado anteriormente respecto a las pérdidas máximas de tensión, la sección mínima de los cables en cada circuito debe ser de 4 mm<sup>2</sup> entre el generador fotovoltaico y el convertidor, y de 2'5 mm<sup>2</sup> entre el convertidor y el grupo motobomba. (O)**

**CAB3. Los cables de señal deben tener una sección mínima de 1 mm<sup>2</sup>. (R)**

**CAB4. Por otro lado, los cables exteriores deben estar especialmente adaptados a las condiciones de intemperie de acuerdo a la norma internacional IEC60811, o a la**

norma nacional adoptada. (O)

CAB5. Todos los terminales de los cables deben permitir una conexión segura y robusta desde el punto de vista mecánico. Deben tener una resistencia eléctrica baja, que asegure unas pérdidas de tensión inferiores al 0'5% de la tensión nominal de funcionamiento. Lo dicho aplica a cada terminal por separado y en las condiciones de corriente máxima de funcionamiento. (O)

CAB6. Los terminales de los cables no deben ser propensos a la corrosión que pueda provenir de los contactos metálicos. (O)

CAB7. El conjunto del cableado debe estar claramente identificado (colores, números, etc). (O)

### **2.2.3.5. Infraestructura hidráulica**

En general, las infraestructuras hidráulicas deben evitar las pérdidas de agua. Estas pérdidas son nefastas por al menos tres razones: Las pérdidas en sí mismas, las averías y perjuicios que pueden causar (humedades en muros, corrosión, goteras, daños en caminos, etc) y el terrible efecto que produce su persistencia, que es contrario al cuidado que hay que tener en la utilización racional de este preciado líquido. También hay que evitar la contaminación del agua por agentes externos en el recorrido que hay desde la fuente hasta el punto de suministro. Por último, las pérdidas de carga introducidas por el bombeo deben ser también lo más pequeñas posible. Para conseguir todo ello, las especificaciones siguientes deben ser respetadas:

IH1. La cabeza de pozo debe disponer de una protección que impida la entrada de objetos sólidos y de desechos líquidos al interior. (O)

IH2. El conjunto de tuberías y accesorios (contadores, grifos, etc) debe ser adecuado para su utilización con agua potable. (O)

IH3. Todos los elementos metálicos deben estar protegidos contra la corrosión. En particular, deben estarlo los elementos accesorios de la conducción (rácores, llaves de paso, grifos, etc). (O)

IH4. Como norma general, la bomba o la conducción de agua entre el pozo y el depósito debe disponer de algún mecanismo antirretorno que evite su vaciado inmediato cada vez que se para la bomba. (O)

IH5. Los depósitos deben disponer de una protección que impida la entrada de suciedad al interior. (O)

IH6. Los depósitos deben disponer de una apertura, o similar, que permita una inspección rápida. Además, deben disponer de un acceso cómodo para poder limpiar su interior. (R)

IH7. El conjunto de las conducciones deben estar conectadas al depósito de manera que conserven su estanqueidad. (R)

IH8. El nivel de admisión del agua en la conducción de salida debe estar situada por encima del fondo del depósito de manera que éste último sirva de decantador. (R)

Las infraestructuras de distribución de agua son especialmente propicias a la entrada de contaminación debido a su recorrido en superficie, y la manipulación indirecta de los usuarios. Conviene insistir que estas infraestructuras son precisamente las que causan la mayoría de los problemas observados en los sistemas de bombeo de agua, y no solamente fotovoltaicos. Por ejemplo, en las capitales europeas, que tenían sistemas de distribución de agua a partir del fin del siglo XIX, las conducciones que tenían fugas de agua eran muy numerosas. Para evitar la entrada de contaminantes se recurría continuamente al aumento de la presión del agua. De esta manera se evitaba que entrasen contaminantes en los conductos. La parte negativa era que aumentaba la cantidad de agua perdida. En algunos casos se llegó a perder el 40% del agua distribuida. Además, en los sitios más secos, no era raro verse en la situación de tener que interrumpir el suministro durante cierto tiempo. Entonces, la pérdida de presión permitía que la contaminación penetrase en las tuberías, llegando a darse el caso de que el agua, normalmente llamada corriente, dejó de ser potable, teniendo los ciudadanos que pasar a consumir agua embotellada. Este ha sido el caso de varias ciudades españolas. La experiencia del PRS muestra cómo los problemas de infraestructuras afectan también a los sistemas fotovoltaicos. En los informes de este proyecto, ya citados en el capítulo anterior, se puede seguir leyendo: “...cerca del 30% de los pueblos tenían fugas en los grifos o problemas en los accesorios”<sup>19</sup>.

Esta realidad pone de manifiesto una práctica desafortunadamente muy extendida en los estudios fotovoltaicos: concentrarse especialmente en los aspectos ligados al bombeo de agua, y descuidar los relacionados con la distribución.

Nosotros también hemos encontrado este problema en Marruecos. El buen sentido común y el cuidado en la ejecución de la instalación son factores clave para conseguir una buena calidad. Como proposición, destacamos aquí las siguientes especificaciones:

**IH9. Las tuberías enterradas deben estar a una profundidad suficiente (a ser posible 60 cm) y conforme al estado del arte (lecho de arena, banda de señalización, etc). (R)**

**IH10. Los puntos susceptibles de sufrir averías (codos, rácores, conexiones, etc) deben estar situados en lugares accesibles para permitir una fácil inspección y mantenimiento. (O)**

**IH11. El sistema de distribución incluirá, al menos, una llave de paso a la salida, y a la entrada de todos los puntos de suministro (fuentes, casas, etc). (R)**

**IH12. La grifería deberá ser de la mayor calidad. (O)**

**IH13. Los puntos de suministro de agua (su ubicación, su altura, acceso, etc) debe permitir a los usuarios la recolección de agua de una manera cómoda utilizando los medios característicos de la región. También deben tener, una correcta canalización de las aguas sobrantes así como impedir el acceso de los animales.(O)**

Las pérdidas de carga en las tuberías, accesorios incluidos, dependen del material con el que están fabricados, de su longitud y del caudal de agua que circula. Éstas disminuyen el caudal suministrado por una bomba. Por esta razón se puede decir que la altura total,  $H_T$ , vista por la bomba es la suma de la altura geométrica,  $H_G$ , y la altura asociada a las pérdidas de carga,  $H_F$ . Como norma general:

**IH14. La sección de las tuberías deben garantizar que las pérdidas de carga no superen el 5% de la altura total vista por la bomba, en las condiciones de trabajo definidas por: altura máxima de bombeo y generador trabajando en las condiciones estándar. (R)**

### **2.2.3.6.Sistema de potabilización de agua**

Hoy en día hay disponibles varios métodos de potabilización de agua. Sin embargo, la purificación mediante lejía es el único método que lo permite sin importar el lugar en donde se haga el tratamiento y, además, que resulte efectivo en toda la red de distribución: depósito, tuberías, etc. Además, el producto necesario, la lejía, está disponible en cualquier parte del mundo. Por ello, restringiremos los comentarios realizados a partir de este momento a esta manera de purificación del agua.

El cloro puede ser periódicamente añadido al depósito, o inyectado automáticamente a la salida de la bomba. Nuestra experiencia en Marruecos, extraída de un buen número de sistemas, nos dicta que la opción de la inyección automática es preferible. Hemos tenido la oportunidad de trabajar con 2 tipos de sistemas de potabilización: bombas eléctricas de inyección alimentadas por pequeños sistemas fotovoltaicos, y bombas de pistón, que funcionan, únicamente, gracias a la energía aportada por el caudal mismo del agua al ser bombeada. A la hora de comparar los 2 tipos de sistemas de potabilización, podemos constatar lo siguiente en lo que respecta a los dos aspectos que más claramente diferencian uno de otro:

- Respecto a la alimentación de los mismos: La bomba de pistón necesita, simplemente que se haga pasar el agua a su través (con algunos elementos adicionales: derivación, llaves y filtro), mientras que las de inyección precisan de una pequeña batería, con su correspondiente sistema fotovoltaico de recarga.
- Respecto al mantenimiento: La bomba de pistón, necesita imperiosamente la instalación de un filtro sin el cual puede quedar fácilmente inservible, ya que el agua bombeada pasa a su través, y ya se ha mencionado en otro punto de este capítulo, que es imposible garantizar su calidad. La bomba de inyección esta libre de este problema, como es obvio, al funcionar de forma aislada del circuito de agua.

Si bien el primer aspecto inclina a elegir las bombas de pistón, los problemas debidos al segundo anulan la ventaja de no precisar alimentación especial. Si nos ubicamos en un contexto aislado, y en el que, cada vez más, los sistemas fotovoltaicos son conocidos, la necesidad de disponer uno de ellos para la bomba de inyección no supone mayor problema. Por contra, para las de pistón, habrá que analizar la disponibilidad local de repuestos como los filtros y las bombas mismas.

Nuestra experiencia en Marruecos ha evidenciado que las bombas eléctricas de inyección representan la opción más aconsejable. Por ello vamos a limitar, a este tipo de bombas, las especificaciones siguientes.

Por motivos de claridad, las especificaciones serán agrupadas en función de la parte del



sistema al que se aplica:

a) Bomba de inyección de cloro

**P1. La bomba de inyección debe tener una protección nivel IP54. (O)**

**P2. La bomba debe ser capaz de bombear hipoclorito sódico sin sufrir daño alguno. (O)**

**P3. La concentración de cloro por  $m^3$  de agua debe respetar la legislación del país. (O)**

**P4. La presión a soportar por la bomba de inyección debe ser un 100% superior a la presión máxima esperada en condiciones normales en el punto de inyección. (R)**

**P5. La bomba de inyección debe estar provista de un detector de “depósito de cloro vacío”. (O)**

**P6. La bomba de inyección debe mantener una linealidad inalterable con la frecuencia de inyección para una gama de alimentación en tensión suficientemente grande ( $V_{NOM} \pm 20\%$ ). (O)**

b) Sensor de caudal de agua bombeada

**P11. El sensor de caudal de agua debe estimar el caudal con un error máximo del  $\pm 5\%$ . (O)**

**P12. Si el sensor de caudal de agua necesita alimentarse con una tensión de alimentación, hay que mantener la linealidad de su función de transferencia para una larga gama de la tensión de alimentación ( $V_{NOM} \sim \pm 20\%$ ). (O)**

**P13. El sensor de caudal de agua debe tener una protección de, al menos, IP54. (O)**

c) Depósito de cloro

**P14. El depósito de cloro debe estar fabricado con un material que permita ver la cantidad restante de hipoclorito sódico. (O)**

**P15. El tapón del depósito de cloro debe estar suficientemente ajustado para minimizar la evaporación del hipoclorito sódico. El orificio necesario para la aspiración del cloro debe ser como máximo de  $1\text{ mm}^2$ . (O)**

Dado que la evaporación del hipoclorito sódico puede dañar la bomba de inyección:

**P17. El depósito de cloro no debe estar situado justo bajo la bomba de inyección. (O)**

## 2.2.4. Seguridad

Los sistemas de bombeo fotovoltaico, como cualquier otra instalación eléctrica, no está libre de riesgos. En concreto, es importante destacar el riesgo para las personas frente al choque eléctrico en presencia de tensiones en continua (DC) superiores a 120 voltios, y/o de tensiones AC superiores a 60 voltios, que es normalmente el caso de esta aplicación.

Esta situación es común en las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, que, debido a su reciente expansión, ha conducido a varios países a desarrollar reglamentaciones específicas. Incluso si la comparación de estos reglamentos no ha lugar aquí, conviene mencionar que las medidas de protección prescritas en estas normas son diversas, y a veces, contradictorias. Por ejemplo, mientras que la *NEC (National Electric Code)* de aplicación en Estados Unidos impone que toda instalación eléctrica con una tensión mayor que 50 voltios debe tener uno de sus polos directamente conectado a tierra, las normas aplicadas en Europa recomiendan precisamente lo contrario, es decir, configuraciones flotantes con los dos polos aislados de tierra. Estas diferencias son el resultado de las particularidades de las dos redes eléctricas en general, y no tienen ninguna relación con los sistemas fotovoltaicos. Por ejemplo, la imposición de configuraciones de puesta a tierra en la *NEC* tienden a privilegiar los fenómenos asociados a las descargas atmosféricas, lo que es coherente con las características de la red eléctrica en los Estados Unidos: tensión relativamente baja (125 V y con numerosas casas construidas de madera en las que el riesgo de incendio es alto). Mientras que las normas europeas privilegian la protección de las personas ante el choque eléctrico, en coherencia con la tensión elevada de sus redes (220V) y con casas construidas a base de materiales poco inflamables. La norma IEC 364-4-41 trata de las protecciones contra los choques eléctricos en general, y constituye una referencia internacional ampliamente seguida.

En el momento de establecer las protecciones de un sistema de bombeo fotovoltaico, hay que considerar, por un lado, el riesgo de contacto directo, que se produce cuando una persona toca directamente un conductor activo, por ello hay que exigir que:

**CAB8. Todos los cables y elementos eléctricos bajo tensión y al alcance de las personas deben estar convenientemente aislados. (O)**

**PT1. Todas las masas conductoras que ocasionalmente puedan ser tocadas por un conductor activo deben estar puestas a tierra. Esto aplica en particular, a los marcos y estructuras soportes del generador fotovoltaico, y a los armarios metálicos de los convertidores de frecuencia. (O)**

**PT2. El valor de la resistencia de la toma de tierra debe ser inferior a la relación  $(120/(I'25.I_{sc}^*))$ , donde  $I_{sc}^*$  es la corriente de cortocircuito del generador en las condiciones estándar. (O)**

Por otro lado, hay que considerar el riesgo de contacto indirecto, que se produce cuando una persona es afectada tras un defecto de aislamiento. La norma IEC 364 describe las diferentes medidas de protección. Son de aplicación a los sistemas fotovoltaicos, con algunas consideraciones particulares. Del lado de las desventajas, los disyuntores diferenciales convencionales no funcionan con corriente continua, y los módulos fotovoltaicos no pueden ser “apagados” de manera instantánea. Del lado de las ventajas, el aislamiento proporcionado por la encapsulación de los módulos fotovoltaicos convencionales es suficiente para que puedan ser considerados como elementos de clase II por ellos mismos, o como aislamiento reforzado, y que la corriente de corto circuito de los módulos está intrínsecamente limitada. Nosotros aconsejamos lo que sigue:

**INS3. Los sistemas de bombeo deben incluir una medida de protección contra el.**

**contacto indirecto, que sea compatible con la norma IEC 364-4-41. (O)**

**INS4. Son especialmente recomendadas las medidas siguientes: aislamiento reforzado, configuración flotante y vigilancia permanente de aislamiento. (R)**

En lo que respecta a los sistemas de potabilización, es necesario recordar que el hipoclorito sódico es peligroso para las personas, y en consecuencia, establecer criterios de seguridad es el punto clave para evitar accidentes. Para conseguir este objetivo, proponemos las especificaciones siguientes:

**P7. La bomba de inyección debe tener un fusible de protección a la entrada de su alimentación eléctrica. (O)**

**P8. La bomba de inyección debe tener un interruptor de parada. (R)**

**P16. El depósito de cloro debe tener una etiqueta que rece: “Peligro: líquido tóxico” en el idioma propio del lugar. (O)**

**P18. El edificio o construcción que albergue el sistema de potabilización debe tener un grifo de agua para un lavado rápido en caso de contacto con el hipoclorito sódico. (O)**

## 2.2.5. Sencillez en el uso

Los sistemas de bombeo son equipos de beneficio común, por tanto, su utilización debe ser confiada a una sola persona, el operador local, que deberá tener unas instrucciones mínimas que le permitan comprender el funcionamiento básico de los equipos, efectuar operaciones básicas de mantenimiento, y detectar las situaciones que requieran el concurso de personas más cualificadas. Por lo tanto, lo más importante que debe saber es reconocer el estado general del sistema, en particular, determinar si una posible parada es debida a causas normales (depósito lleno, falta de agua en el pozo, etc) o anormales (baja potencia DC, motor bloqueado, etc). Por ello:

**M5. El sistema de bombeo debe incluir una visualización indicando al operador local, al menos, las circunstancias siguientes: funcionamiento normal, depósito lleno, falta de agua en el pozo, motor bloqueado, baja potencia DC y cortocircuito a la salida. (O)**

Incluso aunque el funcionamiento del sistema sea automático, es útil incorporar a la salida de la bomba un contador de agua, junto con un cuaderno en el que el operador local anote periódicamente las lecturas del mismo y toda incidencia que se haya podido producir en el curso de la explotación del sistema. Esta medida tiene un coste muy bajo, y garantiza la presencia diaria y la atención del operador. En nuestra experiencia en Marruecos, los caudalímetros han sido así mismo incorporados en todas las casas, y fueron de gran utilidad para, por un lado, detectar fugas ocultas en la red de distribución (comparando los volúmenes de agua bombeada y consumida) y por otro, para una gestión correcta del sistema: tarificación, etc. En consecuencia:

**IH15. Un caudalímetro debe ser instalado en la salida de la bomba para permitir el registro diario del volumen de agua bombeado. (O)**

**IH16. Es muy recomendable también incluir contadores a a la entrada de cada punto de aprovisionamiento de agua. (R)**

A parte de esto, ha lugar resaltar que los puntos de consumo de agua representan la interfase entre el sistema y los usuarios. El diseño de los primeros debe tener presente de una forma primordial a los segundos. Por un lado debe permitir que la recolección del agua sea cómoda y, por otro, que no se produzcan pérdidas indeseables. Por ejemplo, si se trata de fuentes públicas, hay que prever espacio suficiente para que el llenado de los recipientes comúnmente utilizados por los usuarios sea sencillo, y disponer los medios adecuados para drenar el agua que se derrama inevitablemente en estos puntos de aprovisionamiento. Algunos usuarios acuden a por agua con sus recipientes transportados en carros o camiones, es entonces necesario prever conexiones con tubos de goma para su llenado, o, mejor aún, salidas de agua lo suficientemente elevadas de forma que puedan colocarse debajo para un más cómodo repostaje. Estas consideraciones pueden parecer obvias, sin embargo, la experiencia dice que son a menudo olvidadas, y en consecuencia, se termina con escenarios caracterizados por aguas derramadas, lodos y suciedad en la vecindad de los puntos de suministro de agua. Siendo esta situación común en los sistemas de bombeo fotovoltaico hoy día, conviene insistir en este aspecto:

**IH17. El diseño de los puntos de suministro de agua debe facilitar el repostaje de agua, canalizar el agua derramada de forma indeseada y evitar el acceso de los animales. (O)**

En lo referente a los sistemas de potabilización, los criterios siguientes deben ser respetados:

**P9. El buen funcionamiento de la bomba de inyección debe ser indicado con una señal luminosa verde, en caso contrario deberá ser roja. (O)**

**P10. El sistema de potabilización debe indicar, con una señal roja especial, la situación de depósito de cloro vacío. (O)**

## **2.2.6. Sencillez de instalación y mantenimiento**

Para los sistemas de bombeo que deben ser suministrados como sistemas “llave en mano”, el suministrador debe instalar completamente y poner en marcha el sistema antes de dejarlo en manos de los usuarios. Mientras, es posible que también algunas entidades (agencias de desarrollo, sociedades instaladoras, etc) recurran a la adquisición de equipos responsabilizándose ellas mismas de su instalación. En tal caso, el procedimiento de adquisición de los equipos debe prestar atención a que sean entregados todos los materiales necesarios para la instalación: cables, rácores de conexión, elementos de fijación, etc. Además deben también estar convenientemente identificados. En último lugar, se debe incluir la documentación adecuada. Por ello:

**INS5. El suministro de las bombas fotovoltaicas debe incluir todos los elementos necesarios para su instalación (cables, elementos de conexión, tornillería, etc). (O)**

**INS2. Los módulos fotovoltaicos, convertidores DC/AC y motobombas deben estar convenientemente etiquetados. (O)**

El mantenimiento rutinario de los sistemas de bombeo incluirá la limpieza del generador fotovoltaico, la limpieza del depósito, y la reparación de las fugas en la infraestructura hidráulica. Para facilitar estas tareas:

**E6. Las estructuras soporte, y su montaje, deben permitir un acceso cómodo a los módulos fotovoltaicos, tanto para su limpieza como para el control de las conexiones eléctricas. (O)**

**E7. La instalación de las estructuras soporte debe preservar su resistencia a la corrosión, a la fatiga y al viento. (O)**

**IH18. Las infraestructuras de distribución de agua debe estar dotada de llaves de paso que permitan aislar los diferentes tramos de conducción. (O)**

En lo referente a los sistemas de potabilización, las siguientes tareas de mantenimiento serán obligatorias: limpieza del filtro de la bomba de inyección y sustitución de fusibles si fuese necesario. Con el fin de facilitar estas tareas, los criterios siguientes son propuestos:

**P19. El sistema de potabilización debe incluir fusibles y filtros de recambio. (O)**

**P20. Las piezas de recambio deben estar accesibles en el mercado local. (O)**

**P21. Los componentes de cloro que requieran manipulaciones complejas para rellenar el depósito deben ser evitadas. En particular, se recomienda la lejía comercial. (R)**

**P22. Se recomienda la inclusión del “test de color” para controlar la cantidad de cloro en el agua entre las piezas de recambio. (R)**

Finalmente se puede hacer una consideración general en lo referente a la documentación:

**INS1. Todos los sistemas de bombeo y de potabilización deben ser suministrados con una documentación básica (descripción técnica, prevención de accidentes, y esquemas explicativos simples). (O)**

## **2.3. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se ha propuesto una especificación técnica de carácter universal con el objetivo de garantizar la calidad de los sistemas de bombeo de agua mediante energía solar fotovoltaica. Los sistemas contemplados no consideran almacenamiento de energía en baterías, y en cuanto a su funcionalidad, incluyen los de abastecimiento de agua para consumo humano al proponer normas para sistemas de potabilización de agua.

En este capítulo se propone un estándar técnico que sirva como base para el aseguramiento de la calidad en proyectos de bombeo fotovoltaico. Estas especificaciones son el fruto de la experiencia acumulada en la evaluación de diversos proyectos de bombeo, y en particular del proceso de control de calidad puesto en marcha en el proyecto MEDA. Dado el tiempo transcurrido desde la primera instalación, el IES ha tenido oportunidad de experimentar con distintas soluciones técnicas para resolver algunos de los

aspectos de estos sistemas (sistemas de bombeo de cloro fotovoltaico frente a sistemas de pistón, sensores de nivel frente a presostatos, materiales varios para tuberías y accesorios, etc) que han pasado a formar parte de estas especificaciones.

Este conjunto de normas constituye una propuesta, como ya se ha dicho, universal. El precio que se paga con la generalidad es la pérdida de perspectiva en lo referente a detalles particulares de cada proyecto. La propuesta va, pues, acompañada de una clasificación de las normas que permita a los promotores de proyectos de este tipo, adaptarlas a la realidad del proyecto concreto.

Uno de los principales criterios considerados, por su importancia en la electrificación rural, ha sido el de la fiabilidad, entendida como disponibilidad del servicio, lo que ha obligado, no solo a considerar la calidad intrínseca de los componentes del sistema, sino también las condiciones particulares del lugar de ubicación final del sistema.

## Capítulo 3

# Modelado de sistemas de bombeo fotovoltaico

---

### 3.1. Introducción

La comprobación de las especificaciones técnicas propuestas en el capítulo 2 requiere la verificación del servicio entregado por el sistema de bombeo fotovoltaico. La comprobación experimental debe ser complementada por la simulación del comportamiento del sistema bajo las condiciones de referencia y bajo otras condiciones cualesquiera. En este capítulo se describe esta herramienta de simulación que permite calcular el volumen de agua suministrado por un sistema de bombeo dado y su validación contra datos experimentales medidos en el banco de medidas del IES-UPM.

La manera más directa de hallar el volumen de agua bombeado es calculando la energía entregada por un sistema fotovoltaico a través de la resolución de la integral de la potencia que éste entrega a lo largo del intervalo de tiempo que se ha dado en llamar el “año típico”, considerando todos los parámetros que influyen en la eficiencia de cada parte de la cadena del sistema y con la escala de tiempos discretizada en horas o minutos a elección. En las próximas páginas se presentan las dificultades de este procedimiento y las soluciones implementadas utilizando exclusivamente datos disponibles habitualmente, es decir, bases de datos climáticas de acceso general, y datos técnicos ofrecidos por los fabricantes de módulos fotovoltaicos y bombas en su información comercial.

Obviamente, existen muchos modelos que caracterizan el rendimiento de sistemas de bombeo fotovoltaico<sup>25, 49, 50, 51, 52</sup> o de sus componentes<sup>53, 54, 55, 56, 57</sup>, existiendo también varias herramientas de simulación para bombeos fotovoltaicos<sup>58, 59, 60, 61, 62</sup>.



A pesar de ello, hay varias razones que nos han motivado a desarrollar una nueva herramienta de simulación. En primer lugar, la necesidad de disponer de la misma para simular las características de este tipo de sistemas que son exigidas en los procedimientos de control de calidad, básicamente el servicio suministrado por la bomba durante intervalos de tiempo de interés, generalmente diario o anual, y en ciertas condiciones de temperatura y radiación. Segundo, que la herramienta haga uso de modelos de aceptación generalizada para cada parte de los sistemas que nos ocupan. Y tercero, la necesidad de que permita la selección de diferentes escenarios considerando las diferencias entre los valores reales y los nominales, y definidos por las siguientes relaciones  $P_G / P_G^*$  y  $T_{\text{sucio}}(0)/T_{\text{limpio}}(0)$ , refiriéndose la primera a la potencia generada por el generador y la segunda al nivel de suciedad evaluado a través de la transmitancia de su superficie.

## **3.2. Modelado de la energía producida por un generador fotovoltaico**

Conceptualmente, la energía producida por un sistema fotovoltaico a su salida (incluyendo el convertidor DC/AC),  $E_{AC}$ , viene dada por la integral de su potencia a lo largo del tiempo; y la potencia resulta del producto de la irradiancia incidente sobre el plano del generador,  $G$ , por la superficie del generador,  $A_G$ , y por la eficiencia energética de la cadena: generador fotovoltaico, convertidor DC/AC ( $\eta_{G-AC}$ ):

$$E_{AC} = \int_t G A_G \eta_{G-AC} dt \quad (3.1.1)$$

La forma más evidente de calcular esta integral consiste en resolverla directamente en el dominio del tiempo, considerando los diversos factores que influyen en la eficiencia y extendiendo un sumatorio a un “año típico”, las más de las veces discretizado en una escala horaria.

Es importante no olvidar que, sea cual sea el procedimiento elegido para resolver esta integral, debe poder ser implementado utilizando exclusivamente información disponible de forma general, y que ésta se restringe a las bases de datos climáticas que proporcionan algunas instituciones públicas, y a la información comercial que acompaña a los dispositivos que componen el sistema: módulos fotovoltaicos, convertidor DC/AC y motobomba. Por otro lado, hay que considerar que el IES-UPM está llamado, por su propia naturaleza, a convertirse en un importante referente para España respecto a este tipo de cálculos, por lo que debe empeñarse en seleccionar métodos, que por estar suficientemente probados, van a permanecer válidos durante mucho tiempo. Por esta razón, no solo vamos a prestar atención al desarrollo de una herramienta de cálculo, sino también a su análisis y validación.

### **3.2.1. La eficiencia de la cadena energética**

#### **3.2.1.1. Eficiencia del generador fotovoltaico**

Es sabido que la potencia que puede entregar un generador fotovoltaico,  $P_G$ , depende

principalmente de la iluminación eficaz que recibe sobre su plano de instalación,  $G_{ef}$  y, en menor medida, de la temperatura a la que operan sus células,  $T_C$ . Por otro lado, la potencia nominal de un generador fotovoltaico,  $P_G^*$ , se define como la correspondiente a las condiciones estándar de medida, definidas como  $G^* = 1.000 \text{ W/m}^2$  y  $T_C^* = 25^\circ \text{ C}$ . Esto permite escribir:

$$P_G = G_{ef} \cdot A_G \cdot \eta_G \quad \text{y} \quad P_G^* = G^* \cdot A_G \cdot \eta_G^* \quad \Rightarrow \quad P_G = P_G^* \frac{G_{ef}}{G^*} \frac{\eta_G}{\eta_G^*} \quad (3.1.2)$$

ecuación que resulta particularmente conveniente de manejar en la práctica, ya que la relación  $\eta_G/\eta_G^*$  varía linealmente con  $T_C$  de una manera bien conocida, puesto que su medida forma parte de los protocolos de caracterización de módulos fotovoltaicos. Así:

$$\frac{\eta_G}{\eta_G^*} = 1 - \gamma_T (T_C - T_C^*) \quad (3.1.3)$$

donde  $\gamma_T$  es un valor característico que suele figurar en la información técnica que acompaña a los módulos. Cuando no se dispone de un valor medido para este coeficiente, pueden utilizarse por defecto los valores de la tabla 1.

<i>Material</i>	<i>Coficiente de variación de la potencia con la temperatura (<math>\gamma_T</math>) (%/°C)</i>
Silicio cristalino	-0'45
Silicio amorfo	-0'2
CIS	-0'36
CdTe	-0'25

Tabla 1: Coficiente de variación de la potencia con la temperatura para los materiales fotovoltaicos más utilizados en aplicaciones terrestres.

Se puede argüir que el modelo representado por las ecuaciones (3.1.2) y (3.1.3) es susceptible de mejora, introduciendo algún factor que considere que la eficiencia a baja irradiancia (inferior a  $200 \text{ W/m}^2$ ) resulta ligeramente inferior a lo que predice la ecuación (3.1.3). No obstante, tal corrección, que puede tener algún sentido a la hora de representar el comportamiento puntual de un generador fotovoltaico, resulta totalmente irrelevante para el cálculo que nos ocupa, como consecuencia de que la radiación solar recibida anualmente en el rango de la baja irradiancia es muy pequeña. De hecho, el haber de la historia fotovoltaica incluye un cierto bagaje de propuestas basadas en la idea de incorporar la cuantificación de estos efectos en algún procedimiento de ensayo (que sería adicional a la determinación de la curva  $I = I(V)$  en STC) cuyos resultados, a su vez, servirían de base para algún procedimiento de estimación de la energía anual generada por un módulo fotovoltaico<sup>63</sup>. Sin embargo, ninguna de estas propuestas ha logrado el consenso necesario para su generalización. Por el contrario, los autores que han estudiado las diferencias entre tener o no en cuenta esos factores de segundo orden en la estimación

de la energía anual concluyen que tales diferencias son en realidad tan pequeñas que no justifican la complicación adicional que representa tenerlos en cuenta<sup>64</sup>. De nuestra cosecha, podemos añadir que tales diferencias son muy inferiores a la incertidumbre asociada a otros fenómenos no controlables, principalmente, el grado de suciedad que cubre la superficie de los generadores, cuya evolución depende de las características de los alrededores del generador, de la frecuencia de lluvias, etc. Además, y fijándonos en el motivo de estos cálculos, el bombeo de agua, tenemos que la irradiancia umbral a la que va a empezar a funcionar la bomba será superior a los niveles de los que estamos hablando a poco que la bomba sea de tamaño apreciable (>400W). Es decir, que en este rango, el sistema no estará bombeando agua por lo que no merece la pena asumir la complicación adicional. Volveremos a ello más adelante.

Subrayamos que la ecuación (67) se expresa en términos de temperatura de célula, y que este valor debe ser estimado a partir de información que esté generalmente disponible. La alternativa mejor establecida consiste en deducirlo de los valores de irradiancia y temperatura ambiente,  $T_A$ , (posteriormente veremos como se estiman estos valores), mediante la ecuación:

$$T_C = T_A + C_t G_{ef} \quad (3.1.4)$$

donde la constante  $C_t$  vale:

$$C_t = \frac{NOCT(^{\circ}C) - 20}{800W/m^2} \quad (3.1.5)$$

donde  $NOCT$  (“Nominal Operation Cell Temperature”, temperatura nominal de operación de la célula) es un valor característico de los módulos fotovoltaicos, cuya medida también forma parte de sus protocolos de caracterización. El valor de  $NOCT$  de los módulos que constituyen el mercado actual oscila entre 42 y 46 °C, con lo que el valor de  $C_t$  lo hace entre 0'027 y 0'032 °C/(W/m<sup>2</sup>). Una aproximación muy razonable, cuando no se conoce el valor exacto de  $NOCT$  es suponer  $C_t = 0'03$  °C/(W/m<sup>2</sup>).

Tiene algún interés observar que la combinación de las ecuaciones (3.1.2), (3.1.3) y (3.1.4) permite escribir la integral planteada en la ecuación (3.1.1) como:

$$E_{AC} = \frac{P_G^*}{G^*} \int_t G \cdot [1 - \gamma_T (C_t G + T_A - T_C^*)] \eta_{DC/AC} \cdot dt \quad (3.1.6)$$

donde  $\eta_{DC/AC}$  representa la eficiencia del inversor. Esta forma de escribir la ecuación tiene la ventaja de que ha desaparecido el área del generador que, si bien es un parámetro de claro significado físico, resulta escasamente representativo de la entidad del sistema fotovoltaico. En su lugar figura la potencia nominal del generador.

### 3.2.1.2. Eficiencia del inversor DC/AC

Los inversores se caracterizan por su potencia nominal,  $P_i^*$ , y por la evolución de su

eficiencia en función de la carga. Resulta particularmente cómodo expresar el balance de potencia en un inversor en términos de potencias normalizadas con respecto a su potencia nominal. Llamando  $p_s$  a la potencia de salida normalizada, es posible describir la pérdida de potencia y la eficiencia en el inversor, respectivamente, como:

$$\Delta p = k_{i0} + k_{i1} \cdot p_s + k_{i2} \cdot p_s^2 \quad ; \quad \eta_{DC/AC} = \frac{p_s}{p_s + \Delta p} \quad (3.1.7)$$

donde  $k_{i0}$ ,  $k_{i1}$  y  $k_{i2}$  son parámetros adimensionales característicos del inversor, que definen su comportamiento eléctrico:  $k_{i0}$  representa las pérdidas en vacío,  $k_{i1}$  representa las pérdidas que dependen linealmente de la corriente (caídas de tensión en diodos, etc.) y  $k_{i2}$  representa las pérdidas proporcionales al cuadrado de la corriente (efecto Joule en elementos resistivos, etc). Los valores de estos parámetros pueden obtenerse ajustando la ecuación (3.1.7) a la curva experimental de eficiencia del inversor. La figura 1 muestra una de estas curvas, para uno de los convertidores medidos en el IES. Los valores resultantes son  $k_{i0} = 0'0087$ ;  $k_{i1} = 0'0105$  y  $k_{i2} = 0'0239$

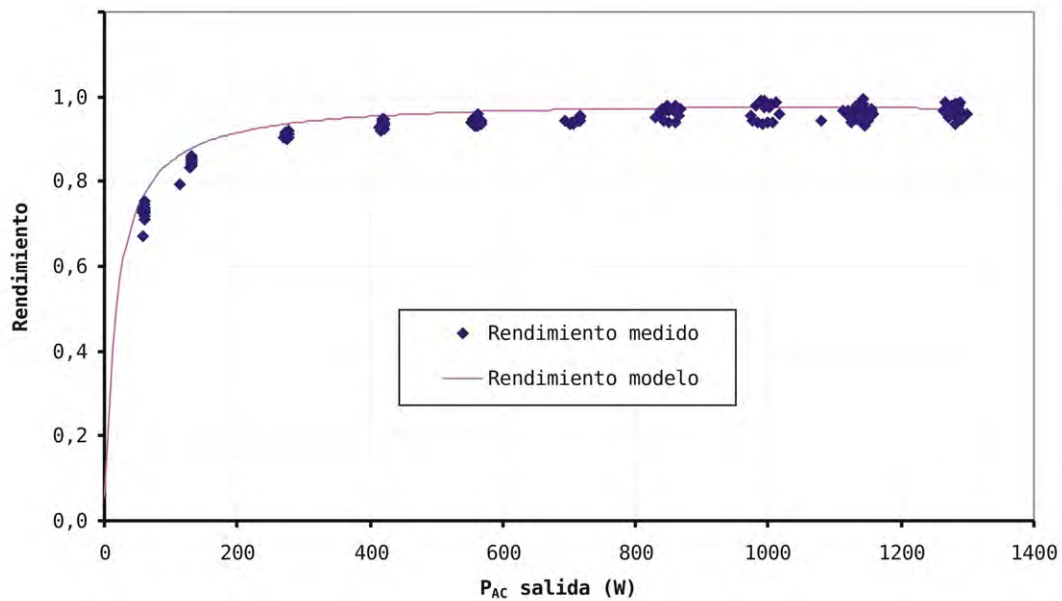


Figura 1: Curva de rendimiento de uno de los convertidores AC/DC utilizados en el proyecto MEDA. Potencia nominal 2'2 kW

### 3.2.1.3. El “año típico”

Las fuentes de información de las que conseguir la información de irradiancia son varias, y a su vez ofrecen estos datos de varias maneras, aunque hay una que es la más extendida. Consiste en los 12 valores de las medias mensuales de la irradiación global diaria sobre superficie horizontal,  $G_{dm}(0)$ . La disponibilidad de esta información se ha visto muy incrementada en los últimos años, debido al desarrollo de métodos estimativos de la

radiación solar a partir de fotografías de satélite, y a la implantación en Internet de aplicaciones informáticas que permiten acceder a la correspondiente información.

La situación práctica más frecuente es disponer, para un mismo lugar, de una diversidad de fuentes de información sobre radiación solar y, por paradójico que pueda resultar, que la información contenida en ellas sea escasamente consistente, lo que plantea el problema de ¿cuál es la más representativa de todas ellas?. Nosotros contrastamos sistemáticamente las mencionadas en la tabla 2.

Base de datos satelitales	
Nombre u organismo	Características
CIEMAT	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resolución espacial 5x5 km<sup>2</sup>.</li><li>• Cubre toda la geografía española, exceptuando Canarias.</li><li>• Acceso actual restringido.</li></ul>
PV-GIS	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resolución espacial 5x5 km<sup>2</sup>.</li><li>• Cubre toda la geografía europea, exceptuando Canarias.</li><li>• Accesible en <a href="http://sunbird.jrc.it/pvgis">http://sunbird.jrc.it/pvgis</a>.</li></ul>
NASA	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resolución espacial <math>\approx 80 \times 120</math> km<sup>2</sup>.</li><li>• Cubre la mayoría de la geografía mundial.</li><li>• Accesible en <a href="http://eosweb.larc.nasa.gov/sse">http://eosweb.larc.nasa.gov/sse</a>.</li></ul>
Bases de datos terrestres:	
H-World	<ul style="list-style-type: none"><li>• Contiene información para unos 3.000 lugares del mundo.</li></ul>
Atlas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Existen atlas de radiación solar para varias regiones.</li></ul>
Estaciones cercanas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Algunas veces existe alguna estación meteorológica cercana</li></ul>

Tabla 2: Fuentes de información sobre datos de radiación solar consultadas sistemáticamente por el IES-UPM.

Las diferencias en el contenido de estas bases llegan a ser tan notables que la elección de una y otra condiciona al resultado del cálculo más que la elección de los modelos de eficiencia descritos en el apartado anterior. Estas diferencias derivan de los distintos períodos de observación y, también, de los distintos métodos de proceso que utilizan los distintos autores. Su análisis comparado resulta rico en matices. Por ejemplo, la comparación de la base NASA con las CIEMAT o PV-GIS indica si el lugar está o no bien elegido, en términos de radiación solar. Si está bien elegido, la radiación solar que recibe debe ser superior a la media de la región circundante, lo que debe reflejarse en que los valores de irradiación indicados en las bases de mejor resolución espacial deben ser superiores a los indicados en la base NASA.

#### *Generación de números representativos*

A partir de los 12 valores de  $G_{dm}(0)$  contenidos en las bases de información, es posible

desarrollar un “año típico” sin más que considerar que éste está constituido por 12 “días típicos” resultantes, cada uno, de estimar el perfil de la evolución de la radiación a lo largo del día. En otras palabras, de estimar valores de irradiancia en cualquier momento del día a partir del valor de la irradiación diaria. El procedimiento mejor establecido fue propuesto originalmente por Liu y Jordan<sup>65</sup>, y enriquecido posteriormente por aportaciones de otros autores, y consiste, primero, en descomponer la irradiación global en sus componentes directo y difuso,  $B_{dm}(0)$  y  $D_{dm}(0)$ , respectivamente, mediante alguna de las diversas ecuaciones empíricas que ofrece la literatura. Nosotros utilizamos la propuesta por Erbs<sup>66</sup>, que es ampliamente considerada como de validez general. Definido el índice de claridad como la relación entre la radiación global y la extra-atmosférica,  $K_{Tm}$ , y la fracción difusa de la radiación como la relación entre el componente difuso y el valor global,  $F_{Dm}$ , la ecuación aplicable es:

Para  $\omega_s \leq 81'4''$  y  $0'3 \leq K_{Tm} \leq 0'8$

$$F_{Dm} = 1'391 - 3'560K_{Tm} + 4'189K_{Tm}^2 - 2'137K_{Tm}^3$$

Para  $\omega_s > 81'4''$  y  $0'3 \leq K_{Tm} \leq 0'8$

$$F_{Dm} = 1'311 - 3'022K_{Tm} + 3'427K_{Tm}^2 - 1'821K_{Tm}^3 \quad (3.1.8)$$

y segundo, en asumir que los perfiles de irradiancia en la tierra son relativamente parecidos a los perfiles de irradiancia extra-atmosférica. Se puede deducir teóricamente que estos últimos se ajustan a la ecuación:

$$\frac{B_0(0)}{B_{0d}(0)} = \frac{\pi}{T} \times \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{(\omega_s \cos \omega_s - \sin \omega_s)} \quad (3.1.9)$$

donde  $\omega$  representa el instante del día (cero al mediodía, negativo por la mañana, y avanzando a un ritmo de 15 grados por hora),  $\omega_s$  el amanecer, y  $T$  representa la duración del día. Entonces, se asume que el perfil diario de la radiación difusa es totalmente coincidente con el de la radiación extra-atmosférica, mientras que el de la radiación global es ligeramente más apuntado al mediodía, como consecuencia de la menor masa de aire relativa que debe atravesar a esa hora la radiación para llegar al suelo. Las ecuaciones relevantes son:

$$D(0) = D_d(0) \frac{B_0(0)}{B_{0d}(0)} \quad (3.1.10)$$

y

$$G(0) = G_d(0) \frac{B_0(0)}{B_{0d}(0)} (a + b \cdot \cos \omega) \quad (3.1.11)$$

donde  $a$  y  $b$  se obtienen de las expresiones empíricas siguientes:

$$a = 0'409 - 0'5016\text{sen}(\omega_s + 60) \quad (3.1.12)$$

y

$$b = 0'6609 + 0'4767\text{sen}(\omega_s + 60) \quad (3.1.13)$$

Obviamente, cabe preguntarse hasta qué punto un procedimiento que genera nada menos que 24 números (un valor de irradiancia global y otro de irradiancia difusa) a partir de sólo uno debe ser contemplado con sospecha, en cuanto a su representatividad real. Más adelante, tendremos ocasión de comprobar que las diferencias entre los valores de  $E_{AC}$  obtenidos cuando se utiliza el procedimiento de generación de números descrito aquí, y cuando se utiliza directamente los datos que están en el origen de las bases de información (por ejemplo, un valor medido cada minuto durante los 365 días de un año) resultan irrelevantes. Y ello justifica que recurramos sistemáticamente a ese procedimiento, incluso en los casos particulares en los que la disponibilidad de datos (por ejemplo, por existir una estación meteorológica cercana) pudiera ser mayor.

#### *Radiación incidente y radiación efectiva*

A partir de los datos de radiación horizontal, ahora ya en términos de valores horarios de los componentes directo y difuso, es posible estimar los valores correspondientes a la radiación incidente sobre la superficie receptora, conociendo los ángulos (figura 2) que definen la posición del Sol en la esfera terrestre: azimut,  $\psi_s$ , y elevación,  $\gamma_s$ ; y los que definen la posición de la superficie: azimut,  $\alpha$ , e inclinación,  $\beta$ .

Las coordenadas del Sol se relacionan con la latitud del lugar,  $\Phi$ , y la declinación del día,  $\delta$ , mediante:

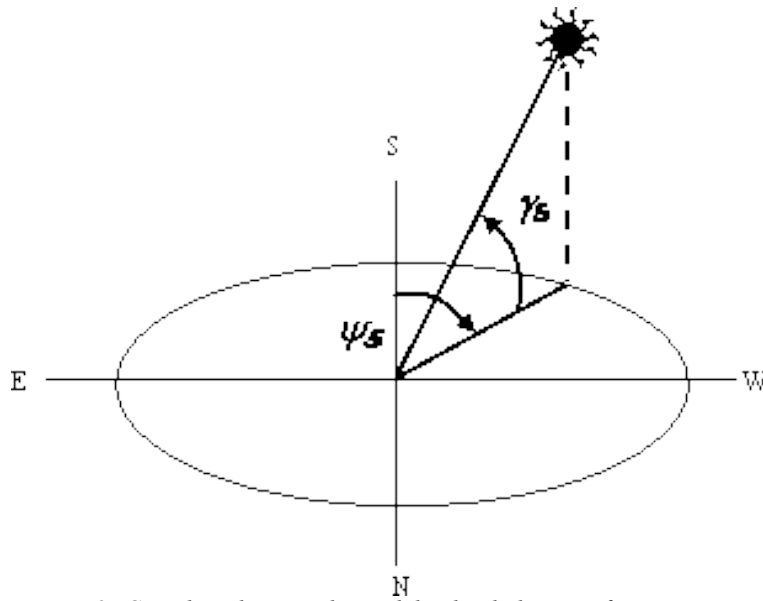


Figura 2: Coordenadas angulares del sol y de la superficie receptora.

$$\cos \theta_{zs} = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = \sin \gamma_s \quad (3.1.14)$$

y

$$\cos \psi_s = \frac{(\sin \gamma_s \cdot \sin \phi - \sin \delta)}{\cos \gamma_s \cos \phi} \cdot [\text{sign}(\phi)] \quad (3.1.15)$$

El procedimiento estimativo se basa en asimilar valores de irradiación horaria con valores de irradiancia, o, lo que es lo mismo, en suponer que durante una hora todo ocurre como si el Sol se mantuviese fijo en la posición correspondiente al instante central de esa hora. Entonces, se pueden calcular los componentes directo, difuso y de albedo, de la irradiancia incidente,  $B(\beta, \alpha)$ ,  $D(\beta, \alpha)$ , y  $AL(\beta, \alpha)$ , respectivamente. El primero se deduce de meras consideraciones geométricas y resulta:

$$B(\beta, \alpha) = \frac{B(0)}{\cos \theta_{zs}} \max(0, \cos \theta_s) \quad (3.1.16)$$

donde  $\theta_s$  es el ángulo de incidencia de los rayos del Sol sobre la superficie receptora que, a su vez, viene dado por:

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - [\text{sign}(\phi)] \cdot \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ & + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ & + [\text{sign}(\phi)] \cdot \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (3.1.17)$$

La estimación del componente difuso requiere hacer alguna suposición sobre la distribución angular de la radiación difusa en el cielo. Aquí seguimos el modelo propuesto



por Hay y McKay<sup>67</sup>, que supone la radiación difusa como constituida por dos componentes: uno circumsolar,  $D^C$ , proveniente de la misma posición donde se encuentra el Sol, y otro isotrópico,  $D^I$ , proveniente por igual de todo el cielo visto por el receptor. La ponderación de ambos componentes responde a lo que estos autores llamaron el índice de anisotropía, definido como la relación entre el componente directo de la radiación y la radiación extra-atmosférica (que es toda directa). Las ecuaciones correspondientes son:

$$D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha) \quad (3.1.18)$$

donde

$$D^I(\beta, \alpha) = D(0)(1 - k_1) \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3.1.19)$$

$$D^C(\beta, \alpha) = \frac{D(0)k_1}{\cos \theta_{zs}} \max(0, \cos \theta_s) \quad (3.1.20)$$

y

$$k_1 = \frac{B(0)}{B_0(0)} = \frac{B}{B_0 \varepsilon_0} \quad (3.1.21)$$

donde  $B$  es la irradiancia directa sobre una superficie perpendicular al Sol (es decir, lo que miden los pirheliómetros),  $B_0$  es la denominada constante solar ( $B_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$ ) y  $\varepsilon_0$ , un factor de corrección que tiene en cuenta la excentricidad de la eclíptica.

La estimación del componente reflejado, siempre relativamente poco importante, recurre a la simple suposición de que el suelo es horizontal, infinito e isotrópico, con lo que

$$AL(\beta, \alpha) = \rho \cdot G(0) \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.1.22)$$

donde  $\rho$  es la reflectividad del suelo, que depende de su composición. Cuando no se conoce ésta es común suponer que  $\rho = 0.2$ .

Una vez determinada la irradiancia incidente sobre el generador, hay que considerar que la transmitancia de los vidrios varía con el ángulo de incidencia y con el grado de suciedad. Una muy buena descripción de este fenómeno, propuesta por J.M. Ruiz Pérez y N. Martín<sup>68</sup>, se logra atendiendo a la relación entre la transmitancia a un ángulo de incidencia,  $T_B(\theta_s)$ , y la transmitancia a incidencia normal,  $T(0)$ , viene dada por la ecuación:

$$FT_B(\theta_s) = \frac{T_B(\theta_s)}{T(0)} = 1 - \frac{\exp(-\frac{\cos\theta_s}{a_r}) - \exp(-\frac{1}{a_r})}{1 - \exp(-\frac{1}{a_r})} \quad (3.1.23)$$

donde  $a_r$  es un parámetro ajustable empíricamente según el grado de suciedad de la superficie. Entonces, la irradiancia directa que efectivamente alcanza a las células solares viene dada por:

$$B_{ef}(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) \times \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \times FT_B(\theta_s) \quad (3.1.24)$$

La consideración de este fenómeno sobre la irradiancia difusa requiere de integrar la expresión (3.1.19) en toda la extensión angular del cielo visto por el receptor. Las expresiones resultantes son:

$$FT_D(\beta) = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{a_r} \left[ c_1 \left( \sin\beta + \frac{\pi - \beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 + \cos\beta} \right) + c_2 \left( \sin\beta + \frac{\pi - \beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 + \cos\beta} \right)^2 \right] \right] \quad (3.1.25)$$

5)

y

$$D_{ef}(\beta, \alpha) = D(\beta, \alpha) \times \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \times FT_D(\theta_s) \quad (3.1.26)$$

Un razonamiento similar para la irradiancia del albedo lleva a:

$$FT_{AL}(\beta) = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{a_r} \left[ c_1 \left( \sin\beta + \frac{\beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 - \cos\beta} \right) + c_2 \left( \sin\beta + \frac{\beta \cdot \frac{\pi}{180} - \sin\beta}{1 - \cos\beta} \right)^2 \right] \right] \quad (3.1.27)$$

y

$$AL_{ef}(\beta, \alpha) = AL(\beta, \alpha) \times \frac{T_{sucio}(0)}{T_{limpio}(0)} \times FT_{AL}(\theta_s) \quad (3.1.28)$$

donde  $c_1 = 4/(3\pi)$  y  $c_2$  está linealmente relacionado con  $a_r$ . La tabla 3 incluye los valores recomendados para los parámetros ajustables.

<b>Grado de suciedad</b>	<b><math>T_{\text{sucio}}(0)/T_{\text{limpio}}(0)</math></b>	<b><math>a_r</math></b>	<b><math>c_2</math></b>
Limpio	1	0'17	-0'069
Bajo	0'98	0'20	-0'054
Medio	0'97	0'21	-0'049
Alto	0'92	0'27	-0'023

Tabla 3: Valores recomendados para los parámetros implicados en el cálculo de las pérdidas angulares.

### 3.2.1.4. La temperatura ambiente

El comportamiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos depende en alguna medida de la temperatura ambiente, de donde se desprende la necesidad de conocer cómo evoluciona ésta a lo largo del día. Los datos más disponibles para abordar este cálculo son los valores de la temperatura máxima,  $T_{aM}$ , y de la temperatura mínima,  $T_{am}$ , normalmente publicados por los Servicios Meteorológicos Nacionales.

Un modelo sencillo, pero que se ajusta francamente bien a las observaciones experimentales, se logra considerando que la temperatura ambiente evoluciona de forma parecida a como lo hace la radiación solar, aunque con un retraso de dos horas. Este hecho lleva a establecer tres supuestos:

- $T_{am}$  ocurre siempre al amanecer ( $\omega = \omega_s$ )
- $T_{aM}$  ocurre siempre dos horas después del mediodía ( $\omega = 30^\circ$ )
- Entre estos instantes, la temperatura ambiente evoluciona como un semiciclo de funciones coseno: una entre el amanecer y las dos de la tarde (hora solar), y otra entre las dos de la tarde y el amanecer del día siguiente.

Un conjunto de ecuaciones, acorde con estos supuestos, que permite calcular la temperatura ambiente en cualquier momento de un día  $j$  es:

para  $-180^\circ < \omega \leq \omega_s$

$$T_a(j, \omega) = T_{aM}(j-1) - \frac{T_{aM}(j-1) - T_{am}(j)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.1.29)$$

donde  $a = \frac{-180}{\omega_s + 330}$  y  $b = -a\omega_s$

para  $\omega_s < \omega \leq 30$

$$T_a(j, \omega) = T_{am}(j) + \frac{T_{aM}(j) - T_{am}(j)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.1.30)$$

$$\text{con } a = \frac{180}{\omega_s - 30} \text{ and } b = -30a$$

y para  $30 < \omega \leq 180$

$$T_a(j, \omega) = T_{aM}(j) - \frac{T_{aM}(j) - T_{aM}(j+1)}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (3.1.31)$$

$$\text{con } a = \frac{180}{330 + \omega_s} \text{ y } b = -(30a + 180)$$

La aplicación estricta de estas ecuaciones exige conocer los valores de la temperatura máxima del día anterior y de la temperatura mínima del día siguiente. En caso de no disponer de estos datos se puede suponer, sin que en general ello conlleve un error importante, que coinciden con los valores del día presente.

### 3.3. Modelado del servicio entregado por una bomba centrífuga

La figura 3 muestra, de una manera esquemática, los componentes de una bomba centrífuga. Si bien, la variedad de este tipo de bombas es muy amplia, todas son máquinas que transforman un trabajo mecánico en hidráulico. Esta transformación energética es inversa a la que realizan las turbinas hidráulicas: mientras en éstas se aprovecha la energía potencial de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, en la bombas centrífugas, la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, al menos parcialmente, en presión y posterior elevación del agua. Este apartado se centra en este tipo de bombas porque son las más extendidas en el campo del bombeo fotovoltaico por sus destacadas características de robustez principalmente.

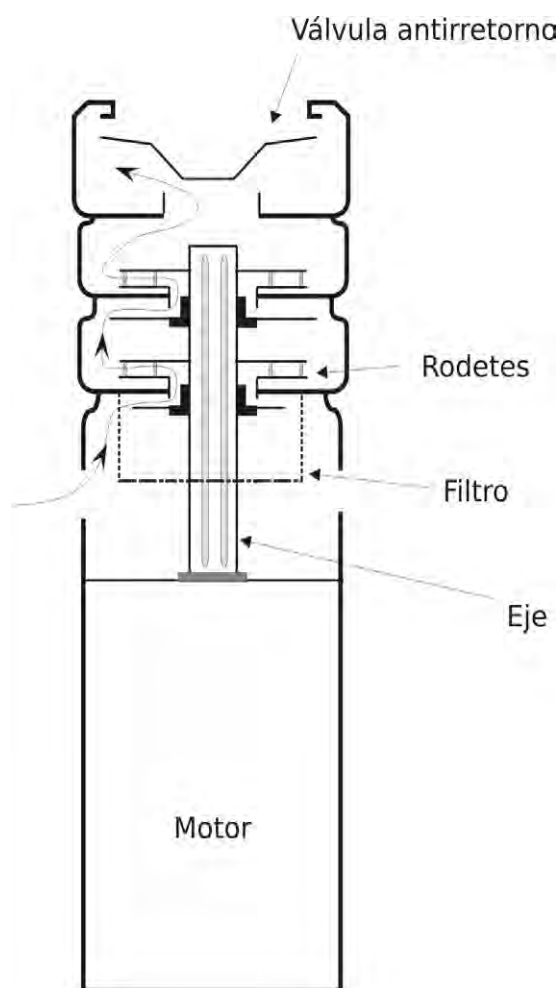


Figura 3: Esquema simplificado de una bomba centrífuga sumergible

### 3.3.1. Relaciones de semejanza geométrica

Los fabricantes de bombas centrífugas proporcionan, junto a sus bombas, información que contiene las principales características de su funcionamiento. Entre esta información se encuentra la que relaciona, a una cierta frecuencia nominal, el caudal de agua que entrega la bomba y la altura a la que lo hace. El conjunto de pares caudal-altura constituye la curva característica de la bomba. Además, dicha curva suele completarse con datos de la potencia eléctrica necesaria para cada punto de la curva.

Esta curva es de gran utilidad cuando la frecuencia nominal coincide con la de funcionamiento, como es el caso cuando se trata de bombas conectadas a la red eléctrica, que trabajan a una frecuencia constante de 50 Hz. Pero éste no es el caso de las bombas conectadas a un sistema fotovoltaico y a un convertidor DC/AC basado en un variador de frecuencia, donde la frecuencia de funcionamiento depende de la potencia suministrada por el generador fotovoltaico y, por lo tanto, de la radiación incidente. El cálculo del punto de trabajo caudal-altura de la bomba cuando la frecuencia es variable requiere de otras “herramientas”: las relaciones de semejanza geométrica son esos útiles que, basándose en

la curva característica nominal de la bomba, permiten calcular el punto de trabajo de las bombas a cualquier velocidad de funcionamiento.

Las ecuaciones generales de semejanza de las bombas son:

$$\frac{f}{f'} = \lambda^{-1} \sqrt{\frac{H}{H'}} ; \frac{Q}{Q'} = \lambda^2 \sqrt{\frac{H}{H'}} ; \frac{P}{P'} = \lambda^2 \left( \frac{H}{H'} \right)^{\frac{3}{2}} ; \frac{C}{C'} = \lambda^3 \frac{H}{H'} \quad (3.1.32)$$

donde  $f$  es el número de revoluciones por unidad de tiempo,  $Q$  es el caudal,  $P$  es la potencia,  $C$  es el par motor y  $\lambda$  es la relación de semejanza geométrica entre las bombas.

Si se considera una bomba como semejante a sí misma, entonces  $\lambda = 1$ , y las ecuaciones que relacionan la frecuencia de rotación, el caudal, la potencia y la altura manométrica en una misma bomba, son:

$$\frac{f}{f'} = \sqrt{\frac{H}{H'}} ; \frac{Q}{Q'} = \sqrt{\frac{H}{H'}} ; \frac{P}{P'} = \sqrt{\left( \frac{H}{H'} \right)^3} ; \frac{C}{C'} = \frac{H}{H'} \quad (3.1.33)$$

Por lo que se puede decir que la frecuencia de rotación de una bomba es proporcional al caudal impulsado, a la raíz cuadrada de la altura manométrica y del par motor, y a la raíz cúbica de la potencia:

$$\frac{f}{f'} = \frac{Q}{Q'} = \sqrt[3]{\frac{P}{P'}} = \sqrt{\frac{C}{C'}} = \sqrt{\frac{H}{H'}} \quad (3.1.34)$$

### 3.3.1.1. Variación de la curva característica en función de la frecuencia de rotación

Las relaciones de semejanza establecen la variación de la altura manométrica y el caudal de una bomba con respecto a la frecuencia de rotación así:

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{f}{f'} ; \frac{H}{H'} = \frac{f^2}{f'^2} \quad (3.1.35)$$

Por otro lado, la ley de variación de la altura manométrica, el caudal y la frecuencia de rotación viene a su vez definida por la ecuación de la curva característica, que tiene la siguiente forma:

$$H = X - YQ - ZQ^2 \quad (3.1.36)$$

donde se puede deducir<sup>69</sup> que los valores de  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  son tales que la expresión de la curva característica es:

$$H = Z_1 f^2 - Z_2 fQ - ZQ^2 \quad (3.1.37)$$

donde  $Z_1$ ,  $Z_2$ , y  $Z$  son constantes propias de cada bomba.

Si se representa en el espacio la ecuación anterior tomando como ejes ortogonales  $H$ ,  $Q$  y  $f$ , resulta un paraboloide hiperbólico que es la superficie característica de la bomba centrífuga. La intersección de dicho paraboloide con la familia de planos de  $f = \text{constante}$  produce una familia de parábolas que constituyen las curvas características de la bomba a diversas frecuencias de rotación.

Estas curvas características parabólicas son congruentes, es decir, sus máximos  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , ..., (ver figura 4) están a su vez sobre otra parábola (OA); asimismo, cada serie de puntos homólogos  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,...,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,..., estarán sobre otras tantas parábolas (OB), (OC),... respectivamente.

Las ecuaciones de dichas parábolas son fácilmente calculables sin más que observar que los máximos de las ecuaciones características de frecuencias de rotación distintas  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,..., tienen coordenadas  $(H_{A1}, Q_{A1})$ ,  $(H_{A2}, Q_{A2})$ ,  $(H_{A3}, Q_{A3})$ ,..., respectivamente, y que sobre ellos se cumple las leyes de la semejanza. Por tanto:

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q_{A_1}}{Q_{A_2}} &= \frac{f_1}{f_2}, & \frac{H_{A_1}}{H_{A_2}} &= \frac{f_1^2}{f_2^2} = \left( \frac{Q_{A_1}}{Q_{A_2}} \right)^2 \\ \frac{Q_{A_2}}{Q_{A_3}} &= \frac{f_2}{f_3}, & \frac{H_{A_2}}{H_{A_3}} &= \frac{f_2^2}{f_3^2} = \left( \frac{Q_{A_2}}{Q_{A_3}} \right)^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{H_{A_1}}{Q_{A_1}^2} = \frac{H_{A_2}}{Q_{A_2}^2} = \dots = \frac{H_A}{Q_A^2} = k_A \quad (3.1.38)$$

donde  $k_A$  es una constante para todos los puntos que están sobre la parábola(OA), por lo que la parábola tendrá la ecuación:  $H_A = k_A Q_A^2$

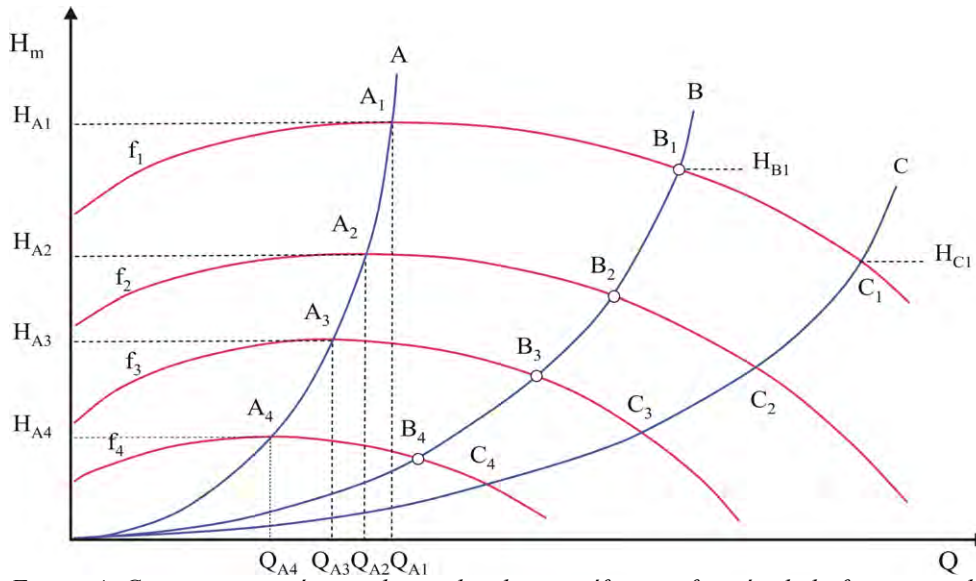


Figura 4: Curvas características de una bomba centrífuga en función de la frecuencia de trabajo ( $f_1, f_2, f_3$  y  $f_4$ ) y para distintas curvas de carga (A, B y C).

Este razonamiento es aplicable a cualquier otra serie de puntos homólogos que no sean los máximos, por lo que estarán sobre otras tantas parábolas de ecuación:

$$H_B = k_B Q_B^2 \quad (3.1.39)$$

$$H_C = k_C Q_C^2 \quad (3.1.40)$$

Estas parábolas se denominan *parábolas de regímenes semejantes o de igual rendimiento*.

Por tanto, si se conoce la curva característica correspondiente a una frecuencia de rotación, se conocen todas las curvas características para frecuencias de rotación cualesquiera, lo que abre las puertas a poder calcular el volumen de agua bombeado a cualquier régimen de trabajo.

El fabricante de una bomba centrífuga proporciona la curva característica de ésta a su frecuencia de rotación nominal. Por un punto cualquiera  $A_1$  de dicha curva caracterizado por su caudal  $Q_{A1}$  y por su altura manométrica  $H_{A1}$  se determina la constante  $k_{A1}$ , que caracteriza la parábola de regímenes semejantes  $H_A = k_A Q_A^2$ , a partir de la cual se puede determinar el caudal o la altura de cualquier otro punto de trabajo de la misma eficiencia sin más que conocer uno de ellos, o bien, conociendo la nueva frecuencia de rotación, a través de las expresiones:

$$Q_{A_2} = Q_{A_1} \frac{f_2}{f_1} \quad (3.1.41)$$



$$H_{A_2} = H_{A_1} \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 = H_{A_1} \left( \frac{Q_{A_2}}{Q_{A_1}} \right)^2 \quad (3.1.42)$$

### 3.4. Cálculo del volumen de agua entregado por una bomba centrífuga trabajando a altura manométrica constante

Como se ha mencionado anteriormente, el fabricante publica la curva característica de la bomba a frecuencia nominal, así como las eficiencias de la bomba y del motor para cada uno de los puntos de funcionamiento de dicha curva característica.

Aplicando el procedimiento descrito en el apartado anterior, podemos calcular, para cada punto de la curva característica, su correspondiente en la parábola de regímenes semejantes con  $H=H_T$ , donde  $H_T$  es el valor constante de altura manométrica a la que trabajaría la bomba si, por ejemplo, se instalara en un pozo de gran capacidad. El nuevo punto de trabajo sería un caudal de valor:  $Q_T = Q_N \sqrt{\frac{H_T}{H_N}}$

Por estar en la misma parábola de regímenes semejantes, mantendrá el mismo valor de eficiencia. De esta manera, obtenemos una curva caudal (variable)-altura (constante) de la que conocemos, para cada uno de sus puntos, la eficiencia de la motobomba.

Por otro lado, la potencia hidráulica necesaria para elevar un caudal de agua  $Q_T$  a una altura  $H_T$  es la siguiente:

$$P_{Hid} = \rho g H_T Q_T \quad (3.1.43)$$

donde  $\rho$  y  $g$  son, respectivamente, los valores de la densidad del agua y de la gravedad.

La potencia eléctrica que será necesario proporcionar a la bomba será dicha potencia hidráulica más las pérdidas producidas en la propia motobomba. Considerando, por tanto, los rendimientos del motor y de la bomba, se alcanza la siguiente expresión:

$$P_{AC} = \frac{\rho g H_T Q_T}{\eta_m \eta_B} \quad (3.1.44)$$

Llegados hasta este punto no es necesario más que subrayar que la recién mencionada potencia eléctrica no es más que la entregada por el conjunto generador fotovoltaico-conversor DC/AC, y cuyo cálculo se ha detallado en la sección 2. Por lo tanto, para cada hora<sup>1</sup>, se calcula la radiación incidente sobre el plano del generador fotovoltaico, la potencia instantánea producida por el generador fotovoltaico, la potencia instantánea producida por el convertidor AC/DC, y con ésta se calcula el caudal proporcionado por la

<sup>1</sup>Los cálculos horarios son los más habituales, pero el modelo desarrollado es capaz de hacer cálculos partiendo de otras frecuencias temporales.

bomba. La expresión que condensaría dichos cálculos sería la siguiente:

$$Q_T = \left( \frac{G_{ef}}{G^*} \right) P^* \left( \frac{\eta_{PV}}{\eta_{PV}^*} \right) \left( \frac{\eta_{DC/AC} \cdot \eta_M \cdot \eta_B}{\rho \cdot g \cdot H_T} \right) \sqrt{\frac{H_N}{H_T}} \quad (3.1.45)$$

donde  $\eta_M$  y  $\eta_B$  son la eficiencia del motor y de la bomba, respectivamente, y son conocidos para cada par  $(Q_T, H_T)$ .

La integración diaria de todos los valores instantáneos de  $Q_T$  permite conocer el volumen de agua entregado por la bomba fotovoltaica.

### 3.5. Validación de los modelos

#### 3.5.1. Escenarios y validación de la energía eléctrica producida

Idealmente, todos los módulos fotovoltaicos que componen un generador son idénticos y su potencia coincide con el valor nominal,  $P_{NM}^*$ , que figura en la información comercial que proporcionan los fabricantes. En estas condiciones, la potencia nominal del generador,  $P_G^*$ , es simplemente igual al producto  $N_M \cdot P_{NM}^*$ , donde  $N_M$  es el número de módulos que lo componen.

Sin embargo, la realidad no es tan sencilla. La potencia de los módulos que salen al mercado está simplemente dentro de un cierto rango  $P_{NM}^* \pm \Delta P$ , por lo que pueden ocurrir dos fenómenos. El primero, porque los módulos respondan más bien a la parte inferior de ese rango, que el promedio de la potencia real de los módulos que componen el generador,  $P_{RM}^*$ , difiera del valor nominal. El segundo, porque los módulos no sean idénticos, que la potencia real del generador resultante sea inferior al producto  $N_M \cdot P_{RM}^*$ . Finalmente, el conjunto de los otros elementos (cables, fusibles, contactos, etc.) presentes en el generador, también representa una cierta pérdida de potencia.

Esta situación, unida a que la práctica de comprobar experimentalmente la potencia real de los generadores está menos extendida de lo que debiera, ha hecho que en el pasado fuesen frecuentes los generadores con potencia real inferior hasta en un 20% a la nominal. Afortunadamente, el propio dinamismo del mercado, unido al hecho de que la rentabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red está ligada directamente a su potencia real, está haciendo que la situación mejore notablemente. Los rangos de potencia tienden a ser cada vez más restringidos (en el pasado, lo normal era un  $\pm 10\%$  en torno de la potencia nominal, mientras que en la actualidad es frecuente hablar de  $\pm 5\%$  e incluso  $\pm 3\%$ ), y muchos fabricantes ofrecen garantías también sobre la potencia promedio de los lotes. No es necesario insistir en que unas buenas prácticas de compra (especificación contractual seguida de ensayos de recepción) pueden ayudar mucho a aquilatar la situación. Pero aun así, y comoquiera que el diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico (y, en último término, la estimación del volumen de agua bombeado) debe preceder a la verificación del generador asociado, en el momento del diseño cabe hablar de una cierta incertidumbre respecto a la potencia real.

A ella hay que añadir la incertidumbre que representa la evolución de la suciedad. Particularmente en los lugares más secos, que suelen ser uno de los escenarios más frecuentes para los sistemas de bombeo, los depósitos de polvo pueden permanecer mucho tiempo y acumularse, antes de que la lluvia los limpie. Es, en particular, el caso del programa de bombeo en el que se ha puesto en práctica todas las recomendaciones dadas en este trabajo (desarrollado en Marruecos, Argelia y Túnez).

Lo que es razonable esperar para el comportamiento real de los actuales sistemas fotovoltaicos oscila entre dos escenarios, definidos por los parámetros que recoge la tabla 4.

Parámetro	Escenario	
	Inferior	Superior
$P_{RM}^* / P_{NM}^*$	0'95	0'97
$P_{RG}^* / (N_M \cdot P_{RM}^*)$	0'95	0'98
De lo anterior: $P_{RG}^* / P_{NG}^*$	0'9	0'95
Grado de suciedad $T_{sucio}(0)/T_{limpio}(0)$	0'97	0'98

Tabla 4: Parámetros representativos de los escenarios de cálculo considerados en el IES-UPM en donde  $P_{RM}$  es la potencia real del módulo,  $P_{NM}$  es la potencia nominal del módulo y  $N_M$ , es el número de módulos. Asimismo, el asterisco indica condiciones estándar y su ausencia condiciones de trabajo.

La comparación de resultados experimentales procedentes de dos sistemas diferentes con las estimaciones derivadas de estos escenarios servirá para contrastar su validez.

El Instituto Tecnológico de Canarias, ITC, dispone en su sede de Pozo Izquierdo, en la isla de Las Palmas de Gran Canaria, de un sistema constituido por un generador fotovoltaico de 11'448 kW, estático, orientado al Sur, inclinado 10° sobre la horizontal y que vierte energía a la red de baja tensión (BT) a través de un inversor de 10 kW. Entre el 30/12/2004 y el 30/12/2005 este sistema operó con una disponibilidad del 100% e inyectó en la red 17.423 kWh, que equivalen a 1.522 kWh/kW. El inversor es muy similar a otro medido en el IES-UPM que exhibe los valores siguientes:  $k_{10} = 0'011$ ;  $k_{11}=0'035$ ;  $k_{12}=0'002$ . La tabla 5 presenta los valores de radiación horizontal y temperatura ambiente que nos han sido proporcionados por el ITC, y que corresponden a los promedios mensuales de los valores diarios observados a lo largo de varios años.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
$G_{dm}(0)$	3.704	4.718	5.247	5.746	7.158	7.959	7.669	7.150	6.090	4.810	3.679	3.168	5.591
$T_{aM}$	22'7	24'5	25'7	25	30'1	32'1	30'3	30'9	30'8	31'2	27'1	24'9	27'9
$T_{am}$	13'2	13'2	14'3	14'07	17'3	19	20'2	21'5	20'8	20	17	15'1	17'2

Tabla 5: Valores representativos de la climatología de Pozo Izquierdo. Los correspondientes a la irradiancia diaria horizontal ( $G_{dm}(0)$ ) vienen dados en  $Wh/m^2$ , mientras que los correspondientes a las temperaturas máxima y mínima diarias vienen dados en grados celsius.

Estos valores, junto con los escenarios definidos en la tabla 4 conducen a estimar una productividad de 1.516 kWh/kW en el escenario inferior, y 1.622 kWh/kW en el escenario

superior, que difieren del valor experimental en -0'4% y 6'5%. Así pues, el escenario denominado inferior resulta ser más representativo de la realidad que el denominado superior. La tabla 6 presenta los valores mensuales de la energía inyectada en la red, tanto experimentales como estimados en este último escenario. Es interesante observar el marcado contraste entre el buen ajuste de los valores anuales y las desviaciones significativas que aparecen algunos meses. Por paradójico que pueda resultar a primera vista, se trata de un resultado perfectamente explicable, a la luz de la variabilidad natural del clima. Basta, por ejemplo, con que el paso de una borrasca coincida con el final de un mes en vez de con el principio del siguiente para provocar grandes diferencias en los ajustes mensuales sin que afecten al ajuste anual.

	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc	Año
Exp.	1.177	976	1.620	1.742	1.896	1.921	2.066	1.783	1.166	1.123	1.052	901	17.423
Est.	1.137	1.239	1.420	1.402	1.803	1.876	1.877	1.810	1.511	1.327	1.056	892	17.350
Dif (%)	-3'4	26'9	-12'3	-19'5	-4'9	-2'3	-9'1	1'5	29'6	18'2	0'4	-1	-0'4

Tabla 6: Valores medidos y estimados para la producción de energía (cifras en kWh) del sistema fotovoltaico que funciona en Pozo Izquierdo, en la sede del ITC. Se observa un marcado contraste entre el ajuste de los valores anuales, ciertamente excelente, y el ajuste de los valores mensuales, muy variable.

Otro ejemplo lo constituye la central solar de Arguedas (Navarra), primera “huerta solar” que funcionó en España. Cada uno de sus 160 propietarios cuenta con un sistema fotovoltaico constituido por un generador de 6'25 kW dotado de seguimiento azimutal y que vierte energía a la red de (BT) baja tensión (el centro de conversión de BT/MT (media tensión) es, en este caso, propiedad de la compañía distribuidora y, en consecuencia, pertenece a la red de transporte y distribución, que asume sus pérdidas como propias) a través de un inversor de 5 kW, de comportamiento muy similar al utilizado en el ITC. Las dimensiones de los seguidores son 7'22x6,4 m<sup>2</sup>, y están separados 14 m en la dirección E-O y 17 en la N-S. La tabla 7 presenta los valores de la radiación horizontal y la temperatura ambiente. Los primeros han sido obtenidos de la base de datos que nos ha facilitado el CIEMAT, para el punto de coordenadas geográficas: Longitud = 1° 35' Oeste, Latitud = 42° 11' N. Los segundos de la página web facilitada por NASA.

	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
$G_{dm}(0)$	2.050	2.870	3.980	4.980	5.860	6.660	6.650	5.850	4.310	3.220	2.200	1.630
$T_{aM}$	9'96	11	12'7	14'5	17'4	22'1	26'2	27'2	24'5	19'1	14'4	10'6
$T_{am}$	-3'6	-1'3	1'87	4'78	8'17	11'9	17'8	17'0	13'8	7'3	0'03	-2'5

Tabla 7: Valores representativos de la climatología de Arguedas (Navarra). Los correspondientes a la irradiación diaria horizontal vienen dados en Wh/m<sup>2</sup>, mientras que los correspondientes a las temperaturas máxima y mínima diarias vienen dados en grados celsius.

La tabla 8 presenta los valores mensuales de la energía inyectada en la red, tanto experimentales como estimados en el denominado escenario inferior. Los datos experimentales corresponden a lo ocurrido a lo largo de los años 2004 y 2005. Abundando en lo anterior, este ejemplo permite observar las grandes diferencias que se observan experimentalmente entre los valores de la producción mensual de los diferentes años, sin que afecten notablemente a la integral anual

	En	Feb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc	Año
Estim.	651	800	970	1.015	1.187	1.266	1.299	1.149	898	878	648	504	11.356
Exp04 Dif(%)	318 104	640 25	821 18'1	1.064 -4'6	1.066 11'3	1.459 -0'13	1.318 -1'4	1.304 -11'9	986 -8'9	905 -3	690 -6	338 49'1	10.910 4
Exp05 Dif(%)	430 51'4	881 -9'2	994 -2'4	939 8'1	1.197 -0'8	1.337 -5'3	1.573 -17'4	1.251 -8'1	1.160 -14'7	777 13	281 11'5	566 -10'9	11.686 -2'8

Tabla 8: Valores medidos y estimados para la producción de energía (cifras en kWh) de uno de los sistemas fotovoltaicos que funciona en Arguedas. De nuevo, se observa un marcado contraste entre el ajuste de los valores anuales, ciertamente excelente, y el ajuste de los valores mensuales, muy variable.

### 3.5.2. Validación de los $m^4$ de agua entregados

Una vez validada la entrega de energía por parte del sistema fotovoltaico resta comprobar la transformación de dicha energía eléctrica en energía potencial expresada en  $m^4$ , es decir,  $m^3$  de agua elevados a una cierta altura expresada en metros. El subsistema encargado de realizar este trabajo es la motobomba.

La validación de los resultados de las simulaciones se ha realizado mediante el contraste con los datos experimentales obtenidos en un banco de ensayo cuyo esquema se muestra en la figura 5 y que será descrito en detalle en el capítulo 4. Este banco utiliza, como entrada, bien una fuente de alimentación, bien un generador fotovoltaico, y registra datos de irradiancia, potencia fotovoltaica generada, altura manométrica de bombeo y caudal entregado por la bomba. Estos registros son minutarios.

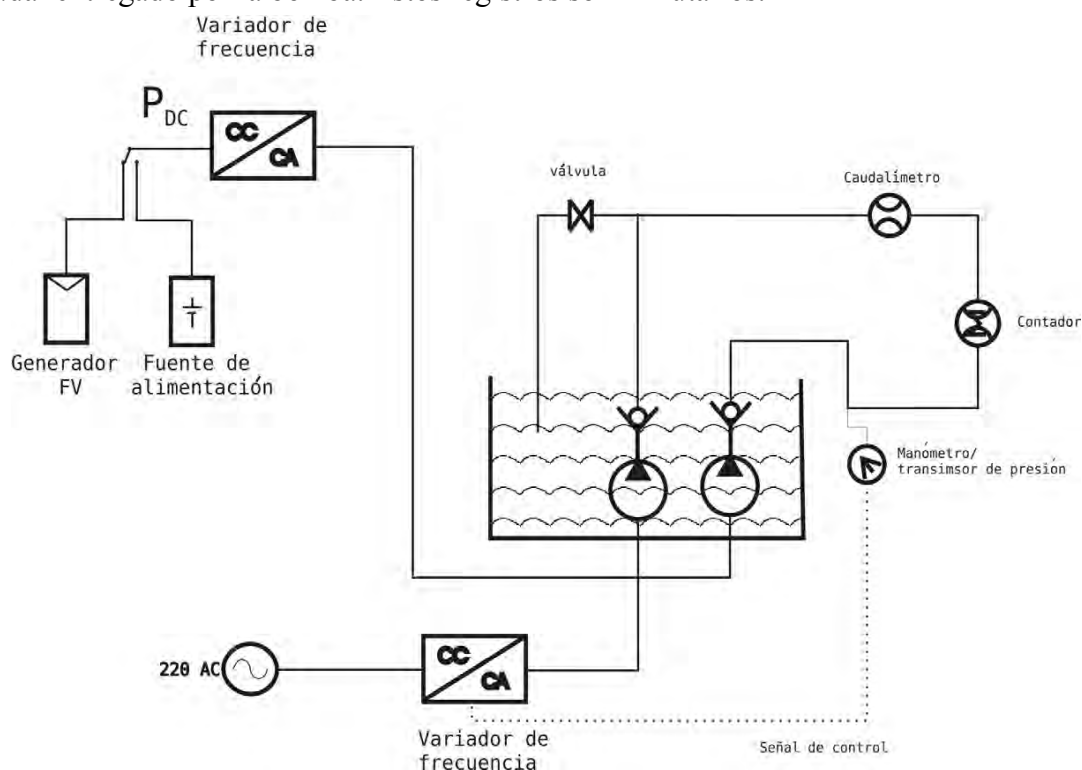


Figura 5: Banco de pruebas usado para validar el modelo propuesto.

Las figuras 6-11 muestran la comparación de los resultados experimentales con los de

las simulaciones para una de las bombas utilizada en el proyecto MEDA (grundfoss SP2A33) y otra de grundfoss pero de distinta gama (SQFlex, más concretamente la SQF-5A6) y para perfiles con irradiancias también distintos. En todos los casos, el parámetro  $R^2$ , que indica la bondad del ajuste entre ambas curvas, supera el valor 0'95. Los resultados mostrados en estas figuras son solo una muestra de una campaña de medidas que ha abarcado varios meses para cada modelo de bomba ensayado.

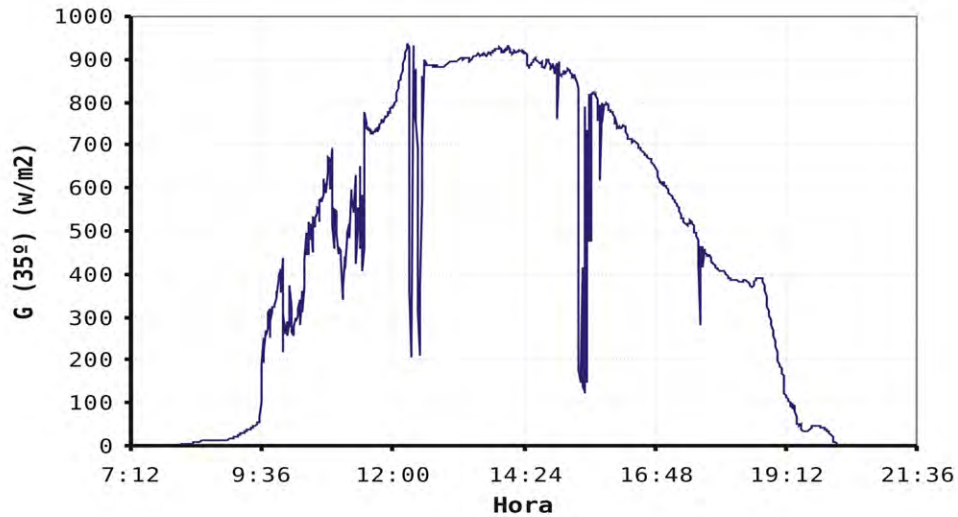


Figura 6: Perfil de irradiancia del 25 de septiembre de 2005.

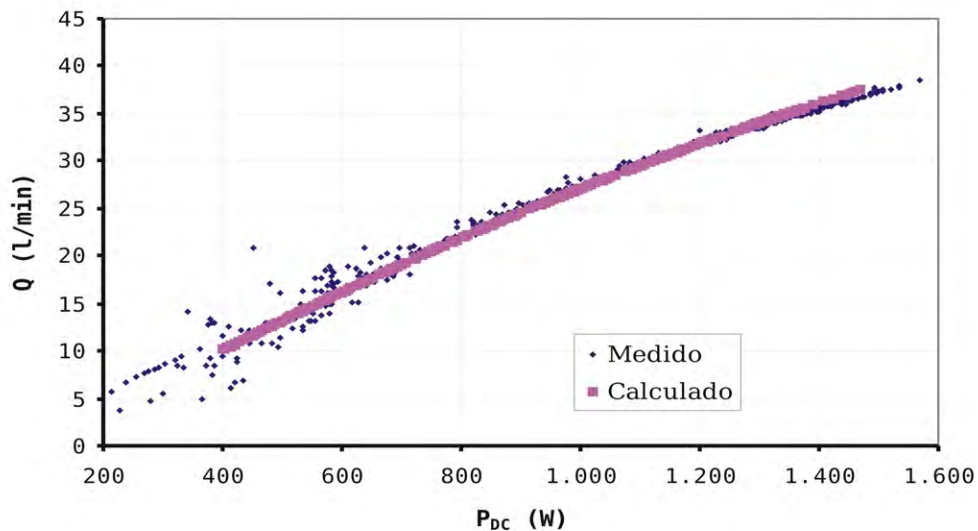


Figura 7: Ajuste entre caudal bombeado y calculado para el 25 de septiembre de 2005 y para una altura de bombeo de 81 metros. Bomba ensayada: Grundfoss SP2A 33.

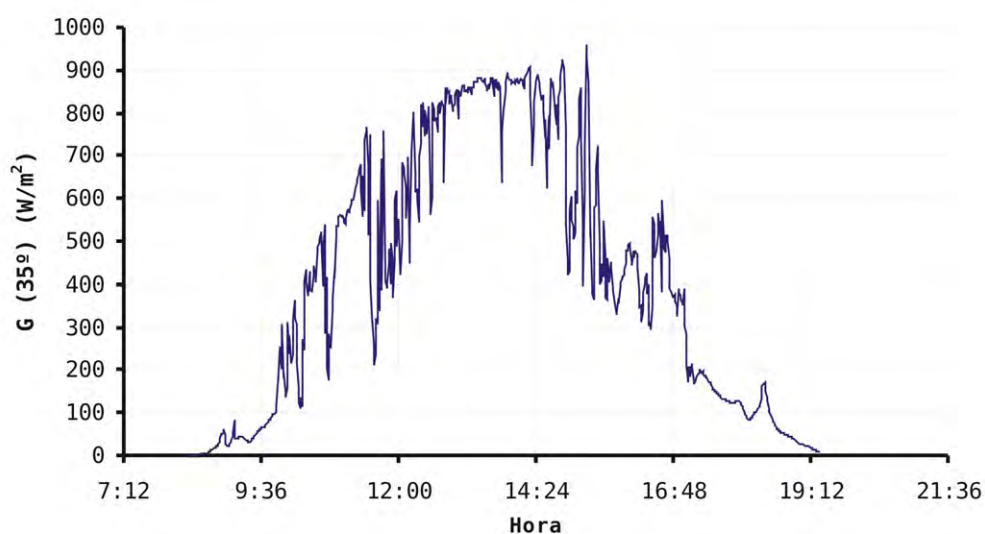


Figura 8: Perfil de irradiancia del 16 de octubre de 2005. En este caso se muestra un perfil más irregular que el anterior para incluir en la medida y su verificación los efectos provocados por esta variabilidad (temperatura, tiempo de reacción del convertidor, de la bomba, etc)

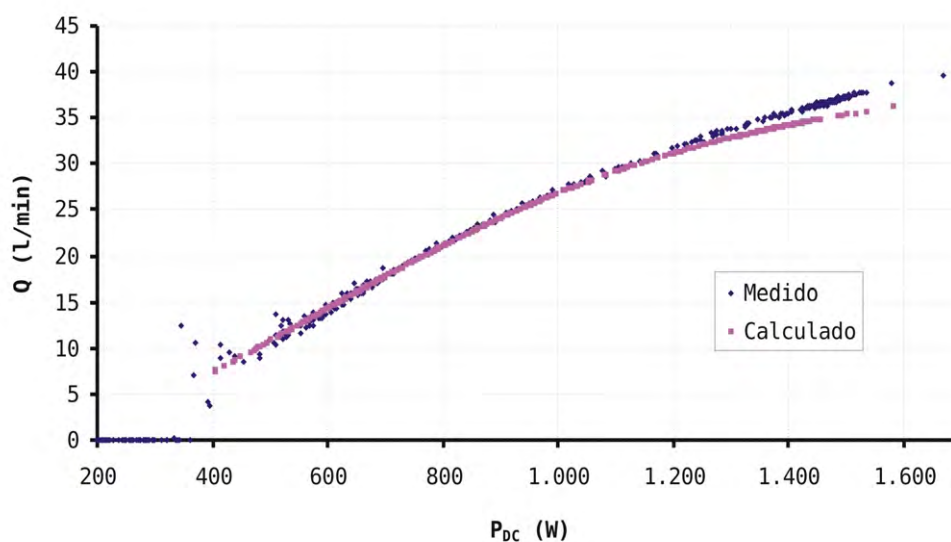


Figura 9: Idem figura 7 para el 16 de octubre de 2005. Como se ve, el modelo sigue muy fielmente lo medido en estas condiciones.

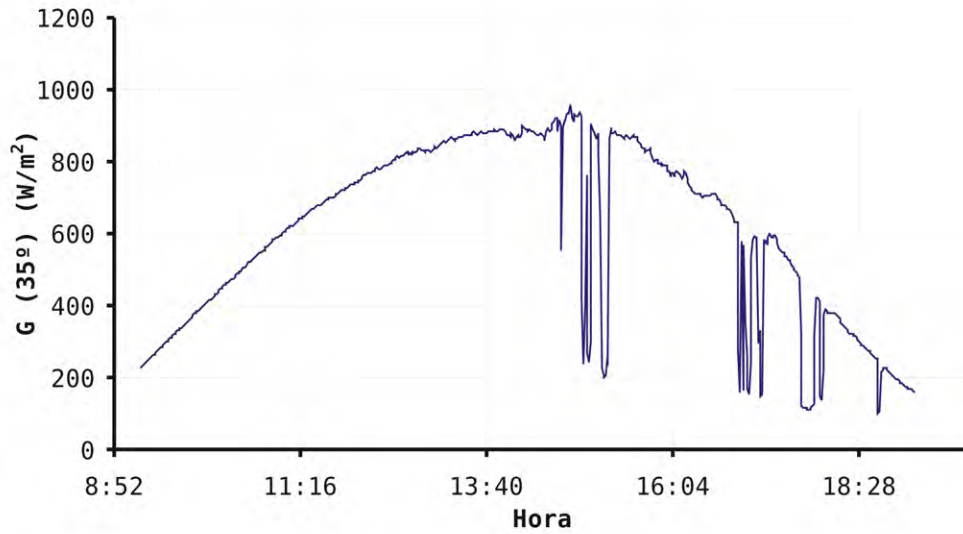


Figura 10: Perfil de irradiancia para el día 7 de junio de 2007.

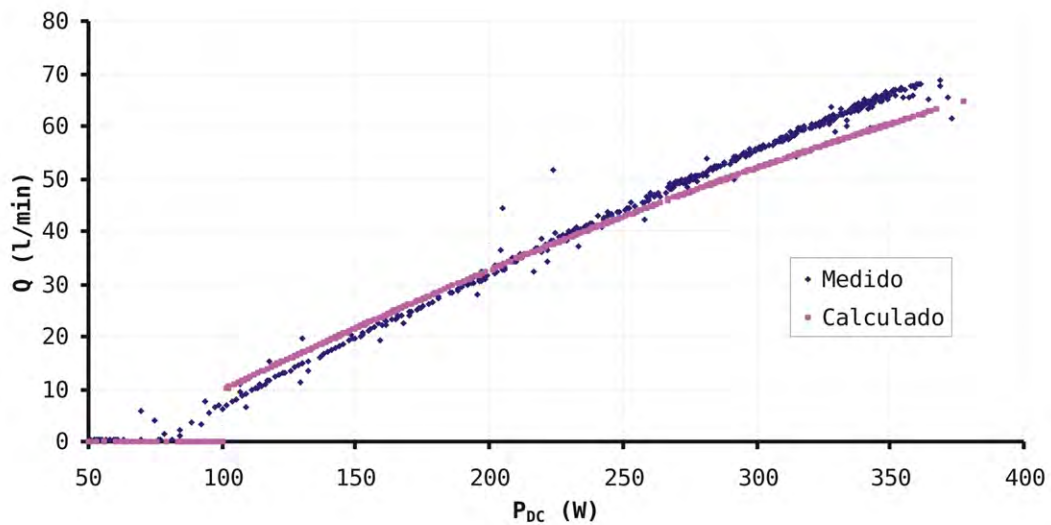


Figura 11: Ajuste entre caudal bombeado y calculado para el 7 de junio de 2007, para una altura de 17 metros y para una bomba modelo Grundfoss SQFlex 5A6

El resultado del cálculo en la figura 11 presenta cierta variación con las medidas debida a la manera en que el fabricante da la curva característica. Al tratarse de una bomba especial para utilización con generadores de energía renovables (fotovoltaicos o eólicos), se da su característica en forma de curvas que muestran el caudal bombeado frente a la potencia absorbida (a diferencia de los demás modelos, en los que la característica representa la altura de bombeo frente al caudal bombeado), siendo en este caso la altura de bombeo un parámetro asignado a cada una de las curvas suministradas, lo que dificulta la extracción de los parámetros característicos necesarios. Por tanto los datos extraídos



correspondientes a la altura concreta del experimento lo es de manera aproximada. De todas maneras, a pesar de esta pequeña diferencia, la simulación conduce a resultados perfectamente válidos si hablamos de total de volumen de agua bombeada en un día como se aprecia en la tabla 9.

<i><b>Fecha</b></i>	<i><b>Bomba</b></i>	<i><b>Volúmen total medido (litros)</b></i>	<i><b>Volúmen total calculado (litros)</b></i>	<i><b>Diferencia (%)</b></i>
25/09/2005	SP2A33	14.926	15.170	1'6
16/10/2005	SP2A33	10.115	10.148	0'3
7/6/2007	SQF 5A6	24.216	24.335	0'5

*Tabla 9: Comparación de los volúmenes totales de agua bombeada en cada caso. Es destacable la concordancia entre los resultados medidos y calculados en términos de volúmenes diarios.*

### **3.5.3. Influencia de la escala temporal de simulación en los resultados de volúmen bombeado de agua**

Obviamente, a la hora de modelar matemáticamente el funcionamiento de un sistema fotovoltaico de bombeo, es necesario que los modelos de radiación resulten realistas. En el contexto que nos ocupa, esto quiere decir simplemente que las estimaciones de producción energética y de volumen total de agua bombeada a las que conducen deben ser sensiblemente iguales a las observadas en la realidad. Es importante parar en este criterio, porque asocia la representatividad de un modelo de radiación no a su capacidad para reproducir las características estadísticas de la propia radiación, sino a su capacidad para reproducir el resultado de un cierto cálculo. La importancia de esta observación radica en que, a pesar de los varios efectos de segundo orden que influyen en el funcionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico, lo cierto es que la potencia que entrega está casi linealmente relacionada con la irradiancia incidente y, en estas condiciones, la energía es simplemente el producto de esa eficiencia por el total de la irradiación incidente, con independencia del perfil de la distribución temporal que esta exhiba. En otras palabras, debido a que el funcionamiento del sistema es cuasi-lineal, es de esperar que el bombeo de agua a lo largo de un cierto período, y el agua bombeada asociada, pueda calcularse atendiendo básicamente a valores medios de la radiación.

Para comprobarlo, hemos utilizado los datos de radiación solar medidos en el IES-UPM durante todo el año 2005 con una periodicidad de 1 minuto, y hemos procedido a calcular el volumen de agua entregado por un hipotético sistema fotovoltaico de bombeo utilizando, como datos de entrada, las alternativas siguientes:

A) La base de datos tal y como está (es decir, un valor experimental por minuto, que representa un total de 262.800 datos para un año: 60 min x 12h x 365d).

B<sub>10</sub>) La base de datos resultante de elegir un único valor cada 10 minutos (es decir, la base de datos que hubiese resultado experimentalmente si las medidas se hubieran registrado con una periodicidad de 10 minutos, y que representaría un total de 26.280

datos para un año).

B<sub>30</sub>) Idem para 30 minutos (8.760 datos individuales para un año)

B<sub>60</sub>) Idem para 60 minutos (4.380 datos individuales para un año)

C<sub>10</sub>) La base de datos resultante de promediar todos los valores comprendidos en un periodo de 10 minutos (es decir, la base de datos que hubiera resultado experimentalmente si las medidas se hubieran registrado como promedios de cada 10 minutos, y que, como en el caso denominado B<sub>10</sub>, representaría un total de 26.280 datos promedio para un año)

C<sub>30</sub>) Idem para 30 minutos (8.760 datos promedio para un año)

C<sub>60</sub>) Idem para 60 minutos (4.380 datos promedio para un año)

D) La base de datos resultante de promediar para cada mes los valores correspondientes a la misma hora del día (es decir, la base de datos que contendría la información horaria correspondiente a los días típicos de cada mes; y que representaría 144 datos para un año: 12hx12d).

E) La base de datos resultante de promediar para cada mes los valores correspondientes a la irradiación diaria (a la hora de calcular, de esta base se deducen valores horarios mediante el procedimiento descrito por las ecuaciones 3.1.10 a 3.1.15. El punto relevante es que ahora la base de datos de entrada no contiene más que 12 números para cada año; precisamente los que constituyen la información que proporcionan la inmensa mayoría de las fuentes de información sobre radiación solar disponibles en la actualidad).

La tabla 10 presenta los resultados, que ponen claramente de manifiesto que el cálculo a partir simplemente de los 12 valores de las medias mensuales de la irradiación diaria global horizontal lleva a precisiones mejores que el 2%. Este resultado es coherente con los presentados por otros autores<sup>70, 71</sup> y representa un sólido argumento a favor de las prácticas más extendidas actualmente.

Datos de entrada (número)	$E(0)$ (kWh)	$E(35)$ (kWh)	$E_{DC}$ (kWh)	Vol. (m <sup>3</sup> )	Diferencia (%)
A (262.800)	1.757	2.061	2.772	4.385	0
B <sub>10</sub> (26.280)	1.760	2.065	2.779	4.395	0'23
B <sub>30</sub> (8.760)	1.763	2.082	2.787	4.406	0'49
B <sub>60</sub> (4.380)	1.768	2.086	2.812	4.445	1'38
C <sub>10</sub> (26.280)	1.758	2.054	2.765	4.392	0'17
C <sub>30</sub> (8.760)	1.758	2.048	2.757	4.389	0'10
C <sub>60</sub> (4.380)	1.757	2.027	2.710	4.325	-1'35
D (144)	1.695	2.044	2.841	4.555	3'89
E (12)	1.779	2.070	2.780	4.463	1'80

Tabla 10. Estimaciones del agua suministrada por un hipotético sistema fotovoltaico de bombeo que opere en el IES-UPM, utilizando diversas alternativas para considerar la radiación solar. La diferencia entre utilizar un año entero de valores de radiación para cada minuto (262.800 números) y utilizar sólo los valores medios mensuales de la irradiación diaria (12 números) es inferior al 2%.

Lo presentado en este apartado constituye un sólido argumento a favor de la validez de los métodos de cálculo basados en promedios mensuales, tal como el presentado aquí. Y no es poca suerte, porque resulta que la disponibilidad de tales promedios es muy amplia para buena parte de la geografía mundial, mientras que la disponibilidad de valores minutarios es escasísima.

#### **Ejemplo de aplicación: Influencia de la variación de la altura manométrica total en el volumen de agua entregada por la bomba**

La selección de una bomba para extraer agua de un cierto pozo y elevarla a una cierta altura viene determinada por el volumen diario de agua que se requiere extraer y por el ajuste entre la altura total de bombeo en ese emplazamiento y la altura nominal de la bomba. Sin embargo, aunque esta selección se haya hecho con rigurosidad y corrección, la altura real a la que opere la bomba en el terreno puede estar muy alejada de la de diseño, y ello por varias razones. Una de ellas es la propia estacionalidad de los pozos, que hace que la profundidad del agua en ellos pueda variar anualmente según se sucedan las estaciones húmedas y las secas. Otra es la permeabilidad del terreno en el que se encuentra el pozo: cuando ésta es baja y la bomba empieza a funcionar, la profundidad de agua en el pozo comienza a descender según un perfil de difusión del agua en el pozo. Éste fenómeno fue descrito con detalle en el capítulo 2 (apartado 2.2.2).

También es probable acabar con una bomba instalada en un pueblo en el que los datos de partida difieren apreciablemente de los utilizados para la selección de la bomba. Por estas y otras razones similares, es pertinente preguntarse por la influencia que tiene esta variación de la altura manométrica de bombeo en el volumen de agua bombeada. La figura 12 muestra dicha influencia.

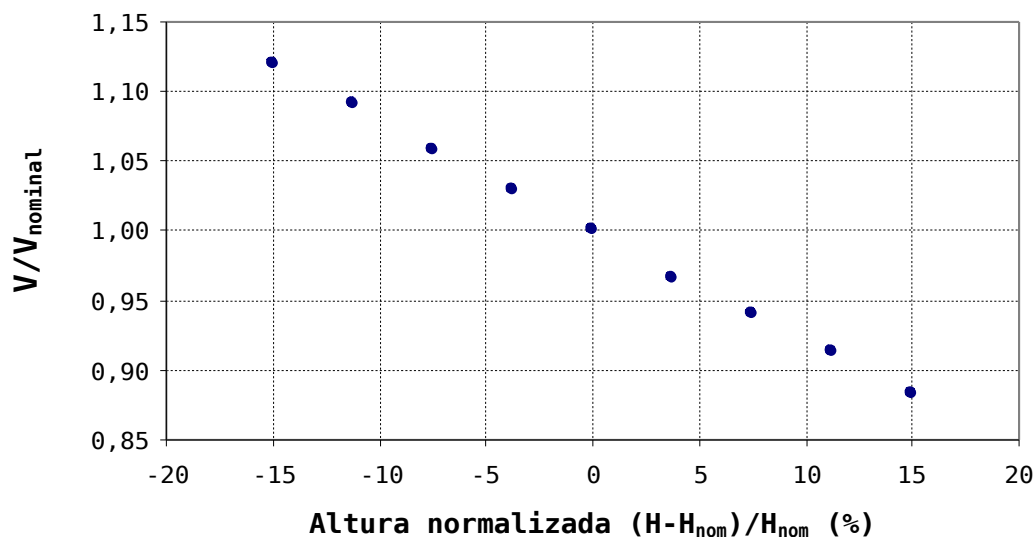


Figura 12: Influencia de la variación de la altura manométrica total de un sistema en términos de volumen de agua bombeada anualmente. El sistema simulado consta de un generador de 1600 W, una bomba centrífuga sumergible de 1'5 kW.

La variación del volumen de agua bombeado anualmente con respecto a la altura es lineal, siempre que las variaciones de altura sufridas no hagan que la bomba trabaje fuera de la zona de rendimiento óptimo. Se puede observar que la variación del volumen de agua es ligeramente menor que la de la altura.

### 3.6. Conclusiones del capítulo

Un procedimiento de control de calidad de sistemas de bombeo fotovoltaico requiere verificar el servicio suministrado por el sistema de bombeo, no solo en las condiciones de referencia de medida, sino también bajo condiciones cualesquiera. En este capítulo se ha descrito en detalle una herramienta de simulación del servicio entregado por el sistema y su verificación utilizando para ello datos experimentales obtenidos gracias al banco de ensayos de que dispone el IES.

La herramienta de simulación se ha desarrollado tomando modelos parciales que hemos considerado más convenientes debido a su extendida aceptación. Incluye la utilización de datos de entrada de radiación de amplia disponibilidad (12 valores medios mensuales de irradiancia media diaria).

Los resultados de la herramienta de simulación han sido validados con datos experimentales extraídos de ensayos de bombas funcionando en el banco de medida

desarrollado en el IES. Para la obtención de los resultados se han utilizado varias bases de datos incluyendo datos con distintas escalas temporales (de minuto en minuto, de diez en diez minutos, cada media hora y con datos diarios) llegando a la conclusión, tras el análisis de los resultados, de que la utilización de los 12 valores medios mensuales de irradiación global conducen a precisiones mejores que el 2%.

Finalmente, se ha realizado un ejemplo de aplicación de la herramienta de simulación para mostrar la influencia de la variación de la altura manométrica total de bombeo en el volumen total de agua bombeada.

## Capítulo 4

### Procedimientos de ensayo

---

#### 4.1. Introducción

Mientras los módulos fotovoltaicos están sometidos a una fuerte estandarización y normalización, avaladas por estrictos procedimientos internacionales de certificación, no existen medidas similares que afecten al resto de componentes del sistema en su uso fotovoltaico. Sin embargo, la calidad de estos componentes y su correcta integración sistémica influyen de manera decisiva en el servicio final y, por tanto, en la satisfacción del usuario y en los costes de mantenimiento. Esta es la razón por la que la necesidad de implementar procedimientos de control de calidad se haya generalizado en el mundo fotovoltaico, y de que gran parte del trabajo realizado en el Instituto de Energía Solar, en lo que a sistemas se refiere, se haya orientado a la elaboración y propuesta de estándares técnicos de vocación universal <sup>37, 72</sup>

La realización de estas propuestas de estandarización y normalización no responde, aunque parezca sorprendente, a una ausencia de normativa, sino a la constatación práctica de que no se está aplicando. A pesar del número de normas propuestas<sup>73, 74, 75, 76, 77</sup>, ninguna se ha aplicado en programas de electrificación rural, exceptuando aquellas que afectan estrictamente a los módulos fotovoltaicos, cuya fabricación centralizada está generalmente sometida a elevados estándares de calidad. En nuestra opinión, la causa de esta paradójica situación es que dichas normas siguen los patrones de otros sectores de la industria mucho más establecidos y que, por lo tanto, disponen de más posibilidades para comprobar que sus productos cumplen con los requisitos de calidad exigidos por las normativas correspondientes. Estas posibilidades están cifradas, por un lado, en términos económicos (necesarios para proceder a una certificación de calidad), y por otro, en términos de estructura, ya que son sectores fuertemente centralizados en los que los criterios de

estandarización y certificación son fácilmente aplicables.

Sin embargo, la realidad de la electrificación rural fotovoltaica para el abastecimiento de agua no es como la descrita. Ésta se caracteriza por ser descentralizada, tanto en la vertiente de la aplicación (se electrifica a pequeños núcleos muy dispersos en áreas muy extensas), como en la de la producción: los sectores industriales que fabrican componentes para bombeo fotovoltaico (sobre todo en lo que a infraestructura hidráulica se refiere) en los países empobrecidos se caracterizan por ser relativamente numerosos pero de pequeño tamaño. Pero, además de por su reducida dimensión, por el contexto socio-económico en el que se desenvuelven, no disponen de los cuantiosos recursos económicos necesarios para invertir en el control de calidad de sus equipos. Sin embargo, las normas citadas anteriormente, concebidas desde parámetros ajenos a esta realidad, requieren para su comprobación la certificación de laboratorios con medios técnicos y humanos muy complejos y costosos, de los que, en realidad, solo disponen, bien los centros de excelencia de los países industrializados, bien los centros de investigación de las grandes multinacionales. Así, este tipo de procesos de calidad queda fuera del alcance de los productores locales y de los promotores de programas rurales de bombeo, quedando en una situación de desamparo técnico real. Además, las normas que en la actualidad comprueban este tipo de laboratorios abordan problemas que no son los más importantes en un contexto rural descentralizado, olvidando los que sí lo son, como es el caso de la fiabilidad. Obviamente, con estas tarjetas de presentación, estos procedimientos de control de calidad rara vez se realizan, dando como resultado que, a pesar de la existencia de normas internacionales, éstas nunca se contemplan en las especificaciones de compra de los programas de electrificación rural para bombeo más allá que de una manera nominal, sin posibilidad de comprobación posterior.

La inclusión de convertidores de frecuencia estándar dentro de la tecnología fotovoltaica de bombeo descentralizado ha permitido la utilización de bombas eléctricas también estándar. El mercado de convertidores y bombas eléctricas es muy extenso, y por ende, maduro y consolidado, lo que ha supuesto un paso adelante en la calidad de los sistemas fotovoltaicos de bombeo (además de una ampliación de sus rangos de potencia). Sin embargo, el porcentaje de estos equipos que en la actualidad se derivan hacia el mercado fotovoltaico es todavía pequeño por lo que su correcta adaptación al bombeo fotovoltaico no es frecuente.

Dicho esto, la propuesta de la especificación técnica presentada en el capítulo 2 no responde, por tanto, a una laguna en la existencia de normas, sino a la imposibilidad práctica de comprobarlas por parte de aquellos países donde se están promoviendo este tipo de programas de bombeo. En este capítulo presentamos los procedimientos de ensayo que hemos desarrollado y que permiten comprobar la adecuación de cada uno de los distintos componentes del sistema de bombeo fotovoltaico a dicha norma.

Con la intención de hacer posible la aplicación local de los procedimientos de ensayo, por ejemplo por las organizaciones que llevan a cabo programas de electrificación rural, hemos prestado especial atención a la simplicidad de los ensayos y a la utilización de instrumentación sencilla y accesible económicamente, de tal manera que, en cualquier laboratorio eléctrico de los que sí disponen los países empobrecidos, e incluso pequeñas

empresas, puedan llevarse a cabo en su totalidad. Además, se propone una reordenación de la norma para adaptarla a las distintas fases que tiene la ejecución de un programa de bombeo fotovoltaico. Con ello se pretende aumentar la capacidad de reacción y de corrección del promotor del programa ante cualquier deficiencia de calidad que se detecte.

Con la definición de estos procedimientos de ensayo se completa una especificación técnica que proporciona los elementos necesarios para realizar un proceso de garantía de la calidad técnica. Esto lo hace especialmente destinado a ser una referencia en los procedimientos de compra de los gobiernos que lleven a cabo programas de bombeo rural, así como de instituciones financieras donantes, etc. También es de utilidad como referencia técnica para fabricantes e instaladores.

## **4.2. Reordenación de las especificaciones técnicas**

La búsqueda de la máxima efectividad de los procedimientos de ensayo de control de calidad obliga a realizarlos en tres fases bien diferenciadas que se corresponden, a su vez, con tres etapas distintas del proceso de instalación de los sistemas de bombeo fotovoltaico:

1. Control de componentes y prototipos
2. Inspección de sistemas tempranos.
3. Inspección de sistemas instalados.

Esta división de los procedimientos de control de calidad permiten asegurar, de una parte, el ajuste de cada uno de los componentes del sistema a las especificaciones descritas en el capítulo anterior, de otra parte, la conformidad del sistema en su globalidad a esas mismas especificaciones y, por último, la bondad de la instalación en el terreno.

La división, a su vez, de la inspección sobre el terreno en dos etapas, una cuando un pequeño porcentaje de las instalaciones han sido ejecutadas, y otra al final del proceso global de instalación, permite, en la primera, reaccionar con correcciones y modificaciones que, de otra manera, no serían posibles debido al gran número de instalaciones ya realizadas.

Obviamente, las comprobaciones de los componentes y de los prototipos que conforman el sistema se realizarán en el laboratorio, previamente a la instalación, mientras que las inspecciones se realizarán sobre el terreno.

Si bien en el capítulo anterior se ordenaron las especificaciones técnicas atendiendo a un criterio expositivo pedagógico, es oportuno en este momento clasificarlas atendiendo, precisamente, a las fases en que dichas normas se van a comprobar: especificaciones de componente, especificaciones de sistema y especificaciones de montaje e instalación. Comenzaremos por los requisitos generales (la capacidad de bombeo y el tamaño de los sistemas) en los que se enmarcan las especificaciones.



## 4.3. Requisitos generales del sistema fotovoltaico de bombeo

### 4.3.1. Capacidad de bombeo y tamaño de los sistemas fotovoltaicos

Especificaciones CO1, CO2, I1, I2 Y B1, que cubren aspectos básicos sobre la estimación del consumo, consideraciones generales sobre irradiación y bombeo, y que redundan directamente en el tamaño final de los sistemas.

**CO1. Si el suministro de agua a la población se efectúa a través de fuentes comunes, el valor del volumen de agua para el cálculo del dimensionado del sistema debe ser de 20 litros por persona y día. (R)**

**CO2. Si el suministro de agua a la población se efectúa a través de grifos individuales en cada casa, el valor del volumen de agua para el dimensionado deberá ser de 45 litros por persona y día (R)**

**I1. El valor de la irradiación diaria incidente sobre la superficie del generador para el diseño debe estar situada entre 5 y 7 kWh/m<sup>2</sup>. El valor central de este margen, es decir, 6 kWh/m<sup>2</sup> esta especialmente aconsejado.(S)**

**I2. Para el dimensionado se considerará el perfil diario de irradiancia descrito en la norma IEC61725 para los valores de la tabla 1. (S)**

**B1. Cuando el bombeo es realizado a partir de sondeos (no pozos tradicionales), el caudal correspondiente al generador funcionando en las condiciones estándar de medida (irradiancia = 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula = 25 °C) debe ser menor que el valor del caudal de caracterización del sondeo. (O)**

### 4.3.2. Especificaciones técnicas de componente

Consideramos que una especificación es “de componente” cuando su comprobación puede hacerse atendiendo exclusivamente al equipo en cuestión (por ejemplo, que un módulo cuente con la certificación IEC6125 o que un convertidor DC/AC esté protegido contra inversión de polaridad). Esta sección describe las especificaciones técnicas que deben cumplir los siguientes componentes: generador fotovoltaico, convertidor DC/AC, motobomba y componentes del sistema de potabilización de agua.

A continuación se enumeran las mismas normas que debe cumplir cada componente según fueron enunciadas en el capítulo 2 y que ahora aprovechamos para clasificarlas de nuevo bajo la perspectiva de su verificación.

#### 4.3.2.1. Generador fotovoltaico

**G1. Los módulos fotovoltaicos deben estar certificados de acuerdo con la norma internacional IEC-61215 ó la norma específica aplicada en el país correspondiente. (O)**

**G2. Los módulos fotovoltaicos deben estar protegidos con diodos de "by-pass"**

contra el fenómeno del punto caliente. (O)

G3. Los generadores fotovoltaicos constituidos por 5 ramas o más conectadas en paralelo deben estar protegidas contra el fenómeno de corriente inversa (O)

G4. La protección a base de fusibles, capaces de soportar una corriente de 2 a 4 veces la corriente de cortocircuito del módulo en condiciones estándar, está particularmente recomendada (R)

#### **4.3.2.2. Convertidor DC/AC**

C1. El convertidor debe resistir sin daños la operación en las condiciones siguientes: Temperatura ambiente de trabajo 45°C, corriente DC de entrada igual al 125% de la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida, en toda la gama de tensiones DC de funcionamiento posibles. (O)

C2. El convertidor debe resistir sin daños la conexión a una tensión DC igual al 125% de la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida. (O)

C3. El convertidor debe estar protegido con un armario que asegure un grado de protección de, al menos, IP 3.2, según está definido en la norma IEC529. (O)

C4. La protección IP4.3 será indiscutible para los convertidores de frecuencia instalados en el exterior. (O)

C5. El convertidor de frecuencia debe estar protegido contra sobre-tensiones inducidas a la entrada mediante la ayuda de un dispositivo de clase C, según está definido por la norma IEC 61024, situado entre cada uno de los polos (+ y -) aislado de tierra, y la tierra misma del sistema. La instalación de este dispositivo debe responder al estado del arte definido por la norma IEC 61024 (O)

C6. Los convertidores deben satisfacer los criterios de emisión de radiofrecuencias establecidos por la etiqueta CE. (R)

#### **4.3.2.3. Motobomba**

M1. Todos los materiales del grupo motobomba deben ser resistentes a la corrosión del agua bombeada.(O)

M2. El sistema de bombeo debe soportar sin daño alguno, al menos 5000 ciclos de arranque-parada en las condiciones de operación definidas por los siguientes 2 parámetros: una altura máxima de bombeo, y un generador fotovoltaico funcionando en condiciones estándar de medida. (O)

M3. Los motores que operan directamente en DC, deben ser del tipo “sin colector de delgas” (R)

M4. La fijación de la motobomba debe ser firme, asegurar una posición vertical, y soportar el retroceso en el arranque.(O)

M5. El sistema de bombeo debe incluir una visualización indicando al operador local, al menos, las circunstancias siguientes: funcionamiento normal, depósito

lleno, falta de agua en el pozo, motor bloqueado, baja potencia DC y cortocircuito a la salida. (O)

#### **4.3.2.4. Sistema de potabilización de agua**

P1. La bomba de inyección debe tener una protección nivel IP54. (O)

P2. La bomba debe ser capaz de bombear hipoclorito sódico sin sufrir daño alguno. (O)

P3. La concentración de cloro por m<sup>3</sup> de agua debe respetar la legislación del país. (O)

P4. La presión a soportar por la bomba de inyección debe ser un 100% superior a la presión máxima esperada en condiciones normales en el punto de inyección. (R)

P5. La bomba de inyección debe estar provista de un detector de “depósito de cloro vacío”. (O)

P6. La bomba de inyección debe mantener una linealidad inalterable con la frecuencia de inyección para una gama de alimentación en tensión suficientemente grande ( $V_{NOM} \pm 20\%$ ). (O)

P7. La bomba de inyección debe tener un fusible de protección a la entrada de su alimentación eléctrica. (O)

P8. La bomba de inyección debe tener un interruptor de parada. (R)

P9. El buen funcionamiento de la bomba de inyección debe ser indicado con una señal luminosa verde, en caso contrario deberá ser roja. (R)

P10. El sistema de potabilización debe indicar, con una señal roja especial, la situación de depósito de cloro vacío. (R)

P11. El sensor de caudal de agua debe estimar el caudal con un error máximo del  $\pm 5\%$ . (O)

P12. Si el sensor de caudal de agua necesita alimentarse con una tensión de alimentación, hay que mantener la linealidad de su función de transferencia para una larga gama de la tensión de alimentación ( $V_{NOM} \sim \pm 20\%$ ). (O)

P13. El sensor de caudal de agua debe tener una protección de, al menos, IP54. (O)

P14. El depósito de cloro debe estar fabricado con un material que permita ver la cantidad restante de hipoclorito sódico. (O)

P15. El tapón del depósito de cloro debe estar suficientemente ajustado para minimizar la evaporación del hipoclorito sódico. El orificio necesario para la aspiración del cloro debe ser como máximo de 1mm<sup>2</sup>. (O)

P16. El depósito de cloro debe tener una etiqueta que rece: “Peligro: líquido tóxico” en el idioma propio del lugar. (O)

P17. El depósito de cloro no debe estar situado justo bajo la bomba de inyección. (O)

#### 4.3.2.5. Cableado

**CAB2.** Sin perjuicio de lo especificado anteriormente respecto a las pérdidas máximas de tensión, la sección mínima de los cables en cada circuito debe ser de 4 mm<sup>2</sup> entre el generador fotovoltaico y el convertidor, y de 2'5 mm<sup>2</sup> entre el convertidor y el grupo motobomba. (O)

**CAB3.** Los cables de señal deben tener una sección mínima de 1mm<sup>2</sup>. (R)

**CAB4.** Por otro lado, los cables exteriores deben estar especialmente adaptados a las condiciones de intemperie de acuerdo a la norma internacional IEC60811, o a la norma nacional adoptada. (O)

**CAB6.** Los terminales de los cables no deben ser propensos a la corrosión que pueda provenir de los contactos metálicos. (O)

#### 4.3.2.6. Estructura soporte

**E1.** Las estructuras soporte deben ser capaces de resistir durante al menos ,10 años, las condiciones de intemperie sin corrosión ni fatigas importantes. (O)

**E3.** Las estructuras soporte fijas son preferibles a las que realizan seguimiento del sol (en uno o dos ejes). (S)

La tablas 1 y 2 resumen de una manera más compacta las normas enumeradas.

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE COMPONENTE (I)</b>						
<b>Partes</b>	Generador FV	Convertidor frecuencia	Motobomba	Potabilización de agua		
				Bomba inyección	Sensor caudal	Depósito cloro
<b>Normas</b>	G1, G2, G3, G4	C1, C2, C3, C4, C5, C6	M1, M2, M3, M4, M5	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10	P11, P12, P13	P14, P15, P16, P17

Tabla 1: Recopilación de normas de componente

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE COMPONENTE (II)</b>		
<b>Partes</b>	Cableado	Estructura soporte
<b>Normas</b>	CAB1, CAB2, CAB3, CAB4, CAB5, CAB6	E1, E2

Tabla 2: Clasificación de las normas técnicas de componente (continuación)

#### 4.3.3. Especificaciones técnicas de sistema

Esta sección describe las especificaciones que afectan a los componentes, en cuanto partes de un sistema y al sistema en su globalidad. Consideramos que una especificación es “de sistema” cuando su comprobación involucra a varios elementos de la instalación. Pongamos dos ejemplos para ilustrar la naturaleza de esta especificación:

- La tensión de trabajo del convertidor de frecuencia tiene que estar de acuerdo con la de

máxima potencia del generador FV.

- Las paradas del bombeo en situaciones anómalas, como el caso de depósito lleno, implican el funcionamiento correcto de varios elementos de la instalación: el sensor de nivel, emplazado en el depósito y que lanza la señal de parada, el cableado que transmite la señal, el del convertidor, deteniendo efectivamente el bombeo, y el temporizador (PLC, o como quiera que sea haya implementado) que retarda el re arranque.

Estas especificaciones serán objeto de ensayo en laboratorio sobre prototipos constituidos por todos los componentes especificados en el apartado anterior, los cables que los unen y la estructura de soporte del generador.

#### **4.3.3.1. Aspectos generales de la instalación**

INS1. Todos los sistemas de bombeo y de potabilización deben ser suministrados con una documentación básica (descripción técnica, prevención de accidentes, y esquemas explicativos simples). (R)

INS2. Los módulos fotovoltaicos, convertidores DC/AC y motobombas debe estar convenientemente etiquetados. (R)

INS3. Los sistemas de bombeo deben incluir una medida de protección contra el contacto indirecto, que sea compatible con la norma IEC 364-4-41. (O)

INS4. Son especialmente recomendadas las medidas siguientes: aislamiento reforzado, configuración flotante y vigilancia permanente de aislamiento. (R)

#### **4.3.3.2. Generador fotovoltaico**

G5. En el caso de módulos fotovoltaicos con marco metálico, el conjunto de la tornillería y los elementos de fijación deben ser exclusivamente de acero inoxidable. (O)

G6. El diseño del generador fotovoltaico debe considerar sistemas de protección contra el robo (S)

#### **4.3.3.3. Convertidor DC/AC**

C7. El funcionamiento en el punto de potencia máxima es preferible, sin embargo el de tensión constante es también aceptable (S).

C8. El sistema de bombeo debe estar protegido contra la eventualidad de falta de agua en la fuente, o, lo que es lo mismo, de la entrada de aire en la bomba. (O)

C9. La protección basada en la detección de un valor de frecuencia elevado es preferible a la protección basada en el nivel de agua en la fuente (pozo, sondeo, etc). (S)

C10. La protección de pérdida de agua en el pozo deberá incluir una temporización que asegure la recuperación del nivel de agua, antes de re arrancar el bombeo. (O)

C11. El sistema de bombeo debe estar protegido contra el bloqueo mecánico de la

bomba (O)

C12. El sistema de bombeo debe estar protegido contra la eventualidad de desbordamiento de agua en el depósito de almacenamiento de agua. (O)

C13. Si la protección contra el desbordamiento de agua en el depósito se hace a través de la parada de la bomba, se debe incluir una temporización que asegure un vaciado razonable del depósito, antes de arrancar de nuevo el bombeo. (O)

#### 4.3.3.4. Cableado

CAB1. La sección del cableado debe permitir limitar las pérdidas de tensión entre el generador y el convertidor a menos del 2%, y a menos del 3% entre el convertidor y la entrada al grupo motobomba. Esta especificación se aplica en condiciones de corriente máxima en funcionamiento, con el generador funcionando en condiciones estándar.

CAB5. Todos los terminales de los cables deben permitir una conexión segura y robusta desde el punto de vista mecánico. Deben tener una resistencia eléctrica baja, que asegure unas pérdidas de tensión inferiores al 0'5% de la tensión nominal de funcionamiento. Lo dicho aplica a cada terminal por separado y en las condiciones de corriente máxima de funcionamiento. (O)

CAB7. El conjunto del cableado debe estar claramente identificado (colores, números, etc). (O)

Y en forma de tabla:

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE SISTEMA</b>				
<i>Partes</i>	Aspectos generales de instalación	Generador FV	Convertidor frecuencia	Cableado
<i>Normas</i>	INS1, INS2, INS3, INS4	G5, G6, G7	C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13	CAB1, CAB5, CAB7

Tabla 3: Recopilación de normas técnicas de sistema

#### 4.3.4. Especificaciones de instalación y montaje

Esta sección incluye todas las especificaciones relacionadas con la instalación y puesta en funcionamiento del sistema, cuya comprobación obliga a ir al terreno.

##### 4.3.4.1. Aspectos generales de la instalación

INS5. El suministro de las bombas fotovoltaicas debe incluir todos los elementos necesarios para su instalación (cables, elementos de conexión, tornillería, etc). (O)

##### 4.3.4.2. Generador fotovoltaico

G7. Los generadores fotovoltaicos deben estar totalmente libres de sombras en el intervalo de 8 horas centrado en el medio día solar. (R)

#### 4.3.4.3. Sistema de potabilización

P17. El depósito de cloro no debe estar situado justo bajo la bomba de inyección. (O)

P18. El edificio o construcción que albergue el sistema de potabilización debe tener un grifo de agua para un lavado rápido en caso de contacto accidental con el hipoclorito sódico. (O)

P19. El sistema de potabilización debe incluir los fusibles y los filtros de recambio. (O)

P20. Las piezas de repuesto deben estar disponibles en el mercado local. (R)

P21. Los componentes de cloro que requieran manipulaciones complejas para rellenar el depósito deben ser evitados. En particular, la lejía comercial es recomendada. (R)

P22. La inclusión de la pieza para el “test de color”, que controla la cantidad de cloro en el agua, debe estar entre las piezas de repuesto. (S)

#### 4.3.4.4. Estructuras de soporte

E2. Las estructuras soporte deben resistir vientos de más de 120 km/h. (R)

E4. La orientación debe ser al norte en el hemisferio sur y al sur en el hemisferio norte. (O)

E5. Inclinación =  $\max \{10^\circ, [\text{abs}(\text{latitud}) - 10^\circ]\}$ . (R)

E6. Las estructuras soporte, y su montaje, deben permitir un acceso cómodo a los módulos fotovoltaicos, tanto para su limpieza como para el control de las conexiones eléctricas. (R)

E7. La instalación de las estructuras soporte debe preservar su resistencia a la corrosión, a la fatiga y al viento. (O)

#### 4.3.4.5. Puesta a tierra

PT1. Todas las masas conductoras que ocasionalmente puedan ser tocadas por un conductor activo deben estar puestas a tierra. Esto aplica en particular, a los marcos y estructuras soportes del generador fotovoltaico, y a los armarios metálicos de los convertidores de frecuencia. (O)

PT2. El valor de la resistencia de la toma de tierra debe ser inferior a la relación  $(120/(1'25 \cdot I_{sc}))$ , donde  $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito del generador en las condiciones estándar. (O)

#### 4.3.4.6. Infraestructura hidráulica

IH1. La cabeza de pozo debe disponer de una protección que impida la entrada de objetos sólidos y de desechos líquidos al interior. (O)

IH2. El conjunto de tuberías y accesorios (contadores, grifos, etc) debe ser adecuado para su utilización con agua potable. (O)

- IH3. Todos los elementos metálicos deben estar protegidos contra la corrosión. En particular, deben estarlo los elementos accesorios de la conducción (racores, llaves de paso, grifos, etc). (O)
- IH4. Como norma general, la bomba o la conducción de agua entre el pozo y el depósito debe disponer de algún mecanismo antirretorno que evite su vaciado inmediato cada vez que se para la bomba. (O)
- IH5. Los depósitos deben disponer de una protección que impida la entrada de suciedad al interior. (O)
- IH6. Los depósitos deben disponer de una apertura, o similar, que permita una inspección rápida. Además, deben disponer de un acceso cómodo para poder limpiar su interior. (R)
- IH7. El conjunto de las conducciones deben estar conectadas al depósito de manera que conserve su estanqueidad. (R)
- IH8. El nivel de admisión del agua en la conducción de salida debe estar situada por encima del fondo del depósito de manera que éste último sirva de decantador. (R)
- IH9. Las tuberías enterradas deben estar a una profundidad suficiente (a ser posible 60cm) y conforme al estado del arte (lecho de arena, banda de señalización, etc). (R)
- IH10. Los puntos susceptibles de sufrir averías (codos, racores, conexiones, etc) deben estar situados en lugares accesibles para permitir una fácil inspección y mantenimiento. (O)
- IH11. El sistema de distribución incluirá, al menos, una llave de paso a la salida, y a la entrada de todos los puntos de suministro (fuentes, casas, etc). (R)
- IH12. La grifería deberá ser de la mayor calidad. (O)
- IH13. Los puntos de suministro de agua (su ubicación, su altura, acceso, etc) debe permitir a los usuarios el aprovisionamiento de agua de una manera cómoda utilizando los medios característicos de la región. También deben tener, una correcta canalización de las aguas sobrantes así como impedir el acceso de los animales.(O)
- IH14. La sección de las tuberías deben garantizar que las pérdidas de carga no superen el 5% de la altura total vista por la bomba, en las condiciones de trabajo definidas por: altura máxima de bombeo y generador trabajando en las condiciones estándar. (R)
- IH15. Un caudalímetro debe ser instalado en la salida de la bomba para permitir el registro diario del volumen de agua bombeado. (R)
- IH16. Es muy recomendable también incluir caudalímetros a la entrada de cada punto de aprovisionamiento de agua. (R)
- IH17. El diseño de los puntos de suministro de agua debe facilitar el aprovisionamiento de agua, canalizar el agua derramada de forma indeseada y evitar el acceso de los animales. (R)

Y, al igual que los apartados anteriores, resumidas en la tabla 4:



<b>ESPECIFICACIONES DE INSTALACIÓN Y MONTAJE</b>						
<i>Partes</i>	General	Generador fotovoltaico	Sistema de potabilización de agua	Estructura soporte	Puesta a tierra	Infraestructuras hidráulicas
<i>Norma</i>	INS5	G7	P17, P18, P19, P20, P21, P22	E2, E4, E5, E6, E7	PT1, PT2	IH1, IH2, IH3, IH4, IH5, IH6, IH7, IH8, IH9, IH10, IH11, IH12, IH13, IH14, IH15, IH16, IH17

Tabla 4: Recopilación de normas de montaje e instalación

## 4.4. Ensayos

En este apartado se enumeran y describen los ensayos que permiten comprobar las especificaciones del apartado anterior.

Los ensayos a realizar se han clasificado en dos grupos: los ensayos a realizar en el laboratorio y los ensayos a realizar sobre el terreno, con los sistemas ya instalados y en funcionamiento. Los primeros sirven, para aceptar como buenos equipos y sistemas frente a la referencia de la especificación técnica. Los segundos tienen como objetivo principal comprobar la bondad de la instalación y de las infraestructuras hidráulicas.

Fuera de la concepción clásica de ensayo queda la verificación de que el esquema de gestión también funciona. Llamado en otros documentos del Instituto de Energía Solar<sup>78</sup> “*orgware*”, se equipara al resto de ensayos porque lo consideramos una parte más del sistema, y como tal, merece la misma atención que las restantes.

### 4.4.1. Ensayos de laboratorio

Los ensayos a realizar en el laboratorio, se clasifican en dos grupos, uno correspondiente a la operación normal del sistema y el segundo que intenta evaluar su comportamiento ante lo que hemos denominado situaciones anómalas que, a pesar de ser poco frecuentes, pueden afectar gravemente a su fiabilidad.

#### 4.4.1.1. Operación normal

Los ensayos agrupados bajo este título buscan, en primer lugar, comprobar que el servicio entregado por la bomba es el especificado, y en segundo lugar, que el sistema, funciona correctamente en las condiciones de operación para las que ha sido diseñado el sistema.

##### 4.4.1.1.1. Ensayo de capacidad de bombeo

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones CO1, CO5, I1, I2, y B1. Para hacer este ensayo, se utiliza el banco de medida que hemos denominado “banco hidráulico” y que, básicamente, es un circuito cerrado de agua con elementos de medida y dispositivos para modificar las condiciones de trabajo de la bomba. Entre los primeros

están, por ejemplo, manómetros, y entre los segundos, bombas mantenedoras de presión. El banco de medidas será objeto de descripción detallada más adelante en este capítulo.

El objetivo del ensayo es comprobar que el volumen diario de agua bombeado por el sistema bajo prueba, a una altura dada, es el especificado. La ejecución del ensayo consta de los siguientes pasos (representada gráficamente en la figura 1):

1. Se pone en marcha el sistema en el banco de medida con una altura de bombeo igual a la dada. La alimentación del sistema de bombeo se realiza con una fuente de alimentación.
2. Actuando sobre la fuente de alimentación se varía la potencia a la entrada al convertidor DC/AC y se registra, para cada valor de la misma, el valor de caudal  $Q$  entregado por el sistema a la altura manométrica dada.
3. Por otro lado, y a partir de las especificaciones del generador fotovoltaico suministradas por el fabricante, se calcula la corriente entregada por el generador para cada uno de los valores de irradiancia del día solar estándar definidos en la norma IEC61725.
4. Combinando la curva  $P_{DC}$ - $Q$  del paso 2 y la curva  $G$ - $P_{DC}$  del paso 3, se calculan los correspondientes valores de caudal a lo largo de cada una de las horas del día solar estándar.
5. Considerando que, a lo largo de cada hora, la irradiancia es constante, se integra ésta a lo largo del día estándar para obtener el volumen diario de agua bombeada. El resultado se suele expresar en metros elevados a la cuarta potencia (volumen ( $m^3$ ) x altura ( $m$ )).

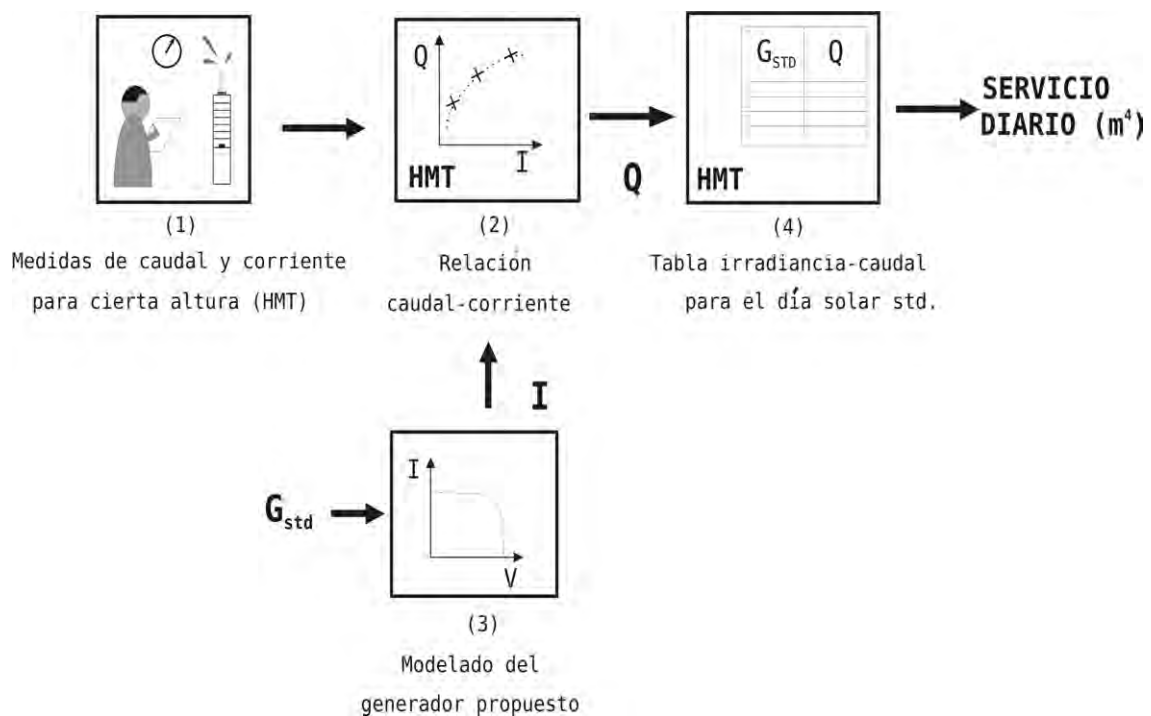


Figura 1: Esquema de los pasos a seguir para la verificación del servicio del sistema

#### **4.4.1.1.2. Ensayo de ciclado**

Este ensayo permite la comprobación de la especificación M2. Pone de manifiesto la fiabilidad del conjunto convertidor DC/AC-motobomba siendo especialmente crítico para el caso de las bombas de desplazamiento positivo en el momento en que arrancan. Consiste, básicamente, en la realización de cierto número de ciclos de arranque-parada forzando a que los arranques sucedan con cierta presión oponente que tendrá que vencer la bomba. El valor de esta presión se hará igual a la que va a trabajar en su emplazamiento final. Tras el ensayo se verificará que el servicio proporcionado por el sistema es el especificado. Si es así, el resultado del ensayo se considerará positivo.

En el apartado dedicado a la descripción del banco de medida, se detallan los elementos necesarios para el desarrollo de la prueba.

#### **4.4.1.1.3. Ensayo de operación a alta temperatura**

Este ensayo permite la comprobación de la especificación C1. Consiste en hacer trabajar los equipos durante una hora a una temperatura de 50°C mientras que el convertidor absorbe una corriente DC igual al 125% de la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida.

La prueba se considerará superada si todos los equipos siguen operativos y el sistema, en su conjunto, suministra el volumen de agua especificado.

Para este ensayo se utiliza el banco de medida denominado “cámara climática” cuya descripción se detalla en la sección 4.3.4 de este capítulo.

### **4.4.1.2. Situaciones anómalas**

Las denominadas aquí situaciones anómalas son situaciones que, sucediendo de una manera esporádica, pueden suponer peligro para la fiabilidad de los equipos y, por tanto, para el suministro de agua. De todas las posibles, las más importantes, por probables, son las de pozo vacío, depósito lleno, bloqueo del motor, inversión de polaridad y sobrecarga de tensión.

#### **4.4.1.2.1. Ensayo de pozo vacío**

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones C8 y C10. Para detectar la situación de pozo vacío se suelen seguir dos estrategias, una, consistente en vigilar la frecuencia de trabajo del motor, y la otra en colocar un sensor de nivel que esté a la misma altura que la toma de agua de la bomba. En el segundo caso, el ensayo en cuestión consiste en probar convenientemente los sensores de nivel. En el primero hay que comprobar que, efectivamente, el convertidor DC/AC detiene el bombeo cuando se llega a cierto valor de frecuencia límite.

Podría darse el caso de que el pozo se vaciase en un día de baja irradiancia, entonces, la bomba no tendría potencia suficiente para llegar a la frecuencia de parada, sucediendo que la bomba funcionaría en vacío pero a frecuencias bajas. Esta situación, sin ser buena, no es preocupante, porque la propia limitación de la potencia de entrada va a hacer lo propio con respecto a la sobrecarga del motor. El hecho de que no supere ni siquiera la frecuencia

nominal de trabajo deshecha cualquier preocupación de daños en el motor. Los motores hoy en día toleran perfectamente trabajar en estas condiciones. Además hay que añadir que la situación de baja potencia de entrada no va a durar, porque lo más probable es que suceda al final del día.

Si el sistema se protege mediante la detección de un valor de frecuencia umbral, el procedimiento de ensayo consiste en sacar la bomba del agua y ponerla en marcha. Comprobar que alcanza la frecuencia umbral y que, entonces, el convertidor DC/AC detiene el bombeo.

Si lo hace mediante sensores de nivel, el ensayo consistirá en el accionamiento de los mismos comprobando que detienen el bombeo. Dada su sencillez, el accionamiento de los sensores se puede hacer manualmente, o, para situarse más cerca de la realidad, con la ayuda de un recipiente con agua, en el que se introducen los mismos para su accionamiento.

En cualquier caso, el ensayo se completa comprobando que se inicia la correspondiente temporización que evite oscilaciones de arranque-parada en el sistema.

Más importante que el accionamiento, es comprobar su robustez desde el punto de vista de su duración en el tiempo, teniendo en cuenta que van a estar durante una gran parte de su vida sumergidos en agua. Detalles como sellados de las partes móviles, estanqueidad de empalmes, sistema de fijación de los cables, etc. son de vital importancia. Estos detalles se comprueban mediante inspección visual.

#### **4.4.1.2.2. Ensayo de depósito lleno**

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones C12 y C13. Se suelen utilizar dos maneras de detectar la situación de depósito lleno y actuar en consecuencia. A saber: por un lado la utilización de sensores de nivel en el depósito y, por otro, la utilización conjunta de presostato y boya de cierre de la tubería de llenado del depósito. Al igual que en el caso del pozo vacío, si se utilizan sensores, el ensayo consiste en probar convenientemente su correcto funcionamiento tal como se detalló en el apartado anterior.

Si se utiliza boya y presostato, el ensayo se concentra en el presostato, comprobando que se acciona cuando se le aplica la presión suficiente. Debe comprobarse el correcto funcionamiento del presostato en todo el rango de presiones especificado por el fabricante.

El procedimiento de ensayo consiste en conectar la toma de presión del presostato al banco de medida denominado “banco hidráulico” y mediante el dispositivo preparado al efecto (grifo que estrangula el paso del agua) hacer elevar la presión al valor especificado. Comprobar que el presostato acciona el contacto, que detiene el bombeo y que se inicia la correspondiente temporización.

#### **4.4.1.2.3. Ensayo de bloqueo del motor**

Este ensayo permite la comprobación de la especificación C10. El procedimiento de ensayo consiste en simular el bloqueo del rotor del motor mediante el cortocircuito de sus

fases. Se mantendrá el cortocircuito hasta que se active la correspondiente alarma del convertidor DC/AC. Y si el equipo no tiene alarma, se mantendrá en esta condición de operación durante una hora.

Tras el ensayo, el convertidor DC/AC y la motobomba deben seguir operativos y suministrando el volumen diario de agua especificado.

#### **4.4.1.2.4. Ensayo de sobretensión**

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones C2 y C5. El procedimiento de ensayo consiste en someter el sistema a una hora de operación con una tensión DC igual al 125 % de la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida. Tras el ensayo, el conjunto convertidor DC/AC-motobomba debe seguir operativo y suministrar, en las condiciones de operación, el volumen de agua especificado. En cuanto a las sobre-tensiones debidas a descargas atmosféricas, se considera suficiente comprobar que el sistema esta provisto de varistores.

#### **4.4.2. Ensayos “in situ”**

En este apartado se relacionan los procedimientos de ensayo cuya realización obliga ir al terreno. Cabe subrayar que se incluyen comprobaciones tanto de la calidad de la instalación de cada componente, como la de las infraestructuras hidráulicas.

Los ensayos que se realizan son:

- Medida de la potencia del generador fotovoltaico.
- Prueba de bombeo: Comprobación in-situ del suministro de agua que proporciona el sistema.
- Prueba de depósito lleno: Comprobación de que el bombeo se detiene en esta circunstancia.
- Inspección visual del estado final de la instalación.
- Comprobación de la existencia de un esquema de gestión del sistema.

##### **4.4.2.1. Medida de la potencia del generador fotovoltaico**

Esta medida permite comprobar que el generador entrega la potencia mínima que se consideró en el ensayo del laboratorio denominado “servicio entregado por la bomba”.

El procedimiento de ensayo consiste en medir la potencia en bornes del generador con el resto del sistema desconectado. Independientemente del método de medida, el resultado debe coincidir con lo declarado por el fabricante teniendo en cuenta los intervalos de tolerancia. Se proponen dos métodos para medir la potencia de un generador fotovoltaico. El primero, más adecuado para generadores de baja potencia (hasta 2 kW aproximadamente), consiste en la utilización de una carga resistiva variable que hace trabajar el generador en varios puntos de trabajo, y el segundo, consiste en la utilización de cargas capacitivas.

El fundamento de la medida usando las segundas, consiste en cargar una capacidad con el generador bajo prueba. El tamaño de la capacidad es definido por el del generador. En el proceso de carga se registran las curvas de corriente y tensión y se representan una contra la otra obteniendo la curva del generador. La característica así obtenida lo es a la irradiancia incidente, y a la temperatura de célula, en el momento de la medida. Posteriormente se extrapola a las condiciones estándar mediante relaciones ampliamente aceptadas en el mundo fotovoltaico<sup>79</sup>.

Por lo tanto, para este proceso de medida es necesario llevar un dispositivo que permita medir la irradiancia y la temperatura de trabajo del generador. Para ello, lo más práctico es utilizar un módulo calibrado de la misma tecnología que la de los instalados en el sistema. Esta opción es muy adecuada desde el punto de vista de la corrección en temperatura de las medidas ya que el comportamiento térmico del patrón se va a asemejar al del generador medido, con la condición de esperar un tiempo prudencial para hacer la medida, y así, asegurar que se uniformizan las temperaturas del generador y del módulo calibrado.

#### **4.4.2.2. Ensayo de bombeo**

Este ensayo permite comprobar que la eficiencia del sistema de bombeo está en el rango de lo comprobado en las medidas de laboratorio y que, por tanto, la instalación del conjunto es correcta.

Debido a que la altura de bombeo en el terreno puede diferir significativamente del valor estándar utilizado en el laboratorio, y a que no existen procedimientos sencillos para trasladar valores de eficiencia de bombeo de una altura estándar a otra cualquiera, resulta extremadamente complejo realizar medidas directas en el terreno del servicio entregado por la bomba.

Sin embargo son muchas las ventajas asociadas a medir la eficiencia del sistema de bombeo en el terreno, más allá de la comprobación del servicio que éste debe entregar. En particular, este ensayo requiere la observación de la evolución del nivel del agua dentro del pozo durante el proceso de bombeo y, por tanto, permite comprobar la capacidad del pozo en relación con la capacidad de extracción del sistema de bombeo. De esta manera, este ensayo permite comprobar si se puede dar alguna situación en la que el pozo se seque y adoptar las medidas correctoras necesarias, ya sea mediante reprofundización o mediante excavación de galerías. Puede resultar sorprendente que se puedan instalar bombas fotovoltaicas en pozos con escasa capacidad y que la capacidad de éstos no haya sido comprobada con anterioridad confirme a los procedimientos estándar existentes. Sin embargo, esta eventualidad suele darse con frecuencia en pozos tradicionales de zonas rurales de países empobrecidos, en los que la información de la que se dispone a menudo no es representativa de lo que existe en la realidad. Este es el caso de las zonas rurales descentralizadas y la ingeniería fotovoltaica de control de calidad debe tenerlo en cuenta.

Dicho esto, este ensayo permite medir el servicio entregado por la bomba en las condiciones reales de operación en el terreno y comprobar que se mantiene en un entorno razonable de lo medido en el laboratorio.

Para su realización son necesarios los siguientes elementos:

- Módulo calibrado de igual tecnología que los instalados.
- Dispositivo de medida del nivel de agua en el pozo. En el caso de pozos tradicionales esta medida no va a suponer ningún problema, pero puede ser diferente en el caso de sondeos. Es conveniente prever esta eventualidad en la fase de especificaciones y exigir que en la fase de instalación se coloque un tubo de plástico que vaya desde la boca de aspiración de la bomba hasta la superficie. Con el concurso de otros accesorios descritos también más adelante, permite medir el nivel dinámico del agua en el pozo.
- El contador de agua propio de la instalación.
- Cronómetro.

La prueba consiste en tomar dos medidas de irradiancia, lectura del contador de agua y nivel del agua dentro del pozo, espaciadas 10 minutos aproximadamente, comprobando que no hay grandes variaciones de la irradiancia incidente y de nivel de agua en el pozo durante el tiempo que dura la medida. La diferencia entre las lecturas del contador de agua permite calcular el volumen de agua bombeada. La realización de estas medidas a distintas irradiancias y, dependiendo de la dinámica del pozo, a distintas alturas manométricas, permite obtener las eficiencias a los distintos puntos de trabajo del sistema.

Si se desea tener un valor aproximado del servicio entregado por la bomba, puede considerarse que la eficiencia y la altura manométrica son constantes a lo largo del día e iguales al valor medido, y que el día tiene una irradiación igual a la del día solar estándar.

Se calcula el volumen bombeado  $V$ , expresado en  $m^3$ , y se toma el tiempo de medida como el transcurrido entre estas dos medidas,  $t$ , en minutos. Se corrige proporcionalmente el volumen de agua extraído para trabajar, a partir de este momento, con un volumen horario de agua bombeada:

$$V_h = V \frac{60}{t}$$

Por otro lado, se considera que la irradiancia medida,  $G_h$ , es constante para la hora modelo.

A continuación se calcula el volumen de agua bombeada en una hora a condiciones estándar de irradiancia, que, para la irradiancia, corresponde a un valor de  $1000 \text{ W/m}^2$ ,

$$V_h^* = V \frac{1000}{G_h}$$

Y finalmente, se calcula el volumen de agua diaria bombeada en un día solar estándar de  $6 \text{ kWh/m}^2$ . Así, se tiene el volumen de agua bombeado diariamente:

$$V_d = 6 V_h$$

Por último, el producto de  $V_d^*$  por  $HMT$  representa el servicio diario del sistema en  $m^4$ .

Pongamos un ejemplo de medida realizada en el proceso de aceptación de los sistemas en el proyecto MEDA ya mencionado. Es el caso del pueblo llamado Essahia en Túnez, en el que el depósito esta situado al lado del pozo y con la salida del agua a una altura de 7 metros, como se puede apreciar en la fotografía de la figura 2. Las medidas realizadas arrojan las siguientes cifras (tabla 5):

<b><i>Tiempo [hh:mm]</i></b>	<b><i>Contador [m³]</i></b>	<b><i>Nivel dinámico (desde la tubería)</i></b>	<b><i>Irradiancias [W/m²]</i></b>
15:09	2.137	23'2	738
15:15	2.138	23'4	720
15:21	2.138	23'5	694
15:29	2.139	23'7	675

Tabla 5: Valores de las distintas magnitudes medidas para la realización del ensayo de bombeo.

A partir de estos datos tenemos:

$$t = 20 \text{ minutos}$$

$$V = 2'34 \text{ m}^3$$

$$V_h = 2'34 * 60/20 = 7'02 \text{ m}^3.$$

$$G_h = 706'75 \text{ W/m}^2$$

$$V_h^* = 7'02 * 1000/706'75 = 9'9 \text{ m}^3$$

por tanto, en el día estándar considerado, que dura 6 horas el sistema bombea

$$V_d^* = 59'4 \text{ m}^3$$

como el valor de altura medio medido es 30'45 metros (23'45 m de media más los 7 metros de altura del depósito), el suministro resulta  $1.809 \text{ m}^4$ .





*Figura 2: Sistema de bombeo en Essahia (Túnez).*

#### **4.4.2.3. Ensayo de depósito lleno**

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones C11 y C12. La prueba de depósito lleno tiene interés por la comprobación del correcto funcionamiento de los dispositivos involucrados, pero además, y aquí está el valor del ensayo in situ, la accesibilidad al detector de nivel (boya o flotador), y su ubicación con respecto al rebosadero del depósito (especificaciones IH5, IH6, IH8).

El procedimiento de ensayo consiste en acceder al dispositivo y forzar la condición de depósito lleno cerrando manualmente la boya o poniendo en posición horizontal el sensor de nivel. El bombeo debe detenerse y la correspondiente temporización iniciarse. En el caso de las boyas, la prueba debe realizarse en un momento en el que la irradiancia disponible sea suficiente para que el sistema pueda elevar la presión hasta el valor umbral que detiene el bombeo.

Al mismo tiempo se comprueba que, en el caso de la boya, la presión a la que está tarado el presostato es la correcta. Y en el caso del sensor de nivel eléctrico, que la transmisión de la señal de parada es también correcta.

#### **4.4.2.4. Uso y gestión del sistema**

Este ensayo permite la comprobación de las especificaciones IH15, IH16, IH10, IH11, IH12 e IH13.

Comprobar la existencia de caudalímetros en la salida de la bomba y en los puntos de consumo, y verificar la organización del sistema de gestión, no parece entrar en la idea

clásica de prueba o ensayo técnico, sin embargo, la existencia de estos elementos y su buen funcionamiento es vital para garantizar una larga vida del sistema de bombeo fotovoltaico. Su comprobación pone de manifiesto ante los usuarios lo importante de la presencia de un operador del sistema (probablemente la parte más importante del esquema organizativo del sistema), permite detectar fugas en la red de distribución (comparando los volúmenes de agua bombeada y consumida), y permite poner en marcha una estructura de gestión que incluya tarificación y cobro por el consumo de agua.

Esta comprobación incluye los siguientes puntos:

- Revisión del cuaderno de anotaciones. En la figura 3, se muestra el modelo utilizado, dentro del proyecto MEDA, en Marruecos, para registrar los datos de consumo y las incidencias de los sistemas. Es importante subrayar que el diseño final del formulario ha sido realizado en estrecha colaboración con la contraparte marroquí.
- Revisión de los puntos de consumo: existencia de caudalímetros, calidad del conjunto de tuberías y accesorios, adaptación a los usuarios de los puntos de aprovisionamiento de agua, existencia de llaves de paso, etc.

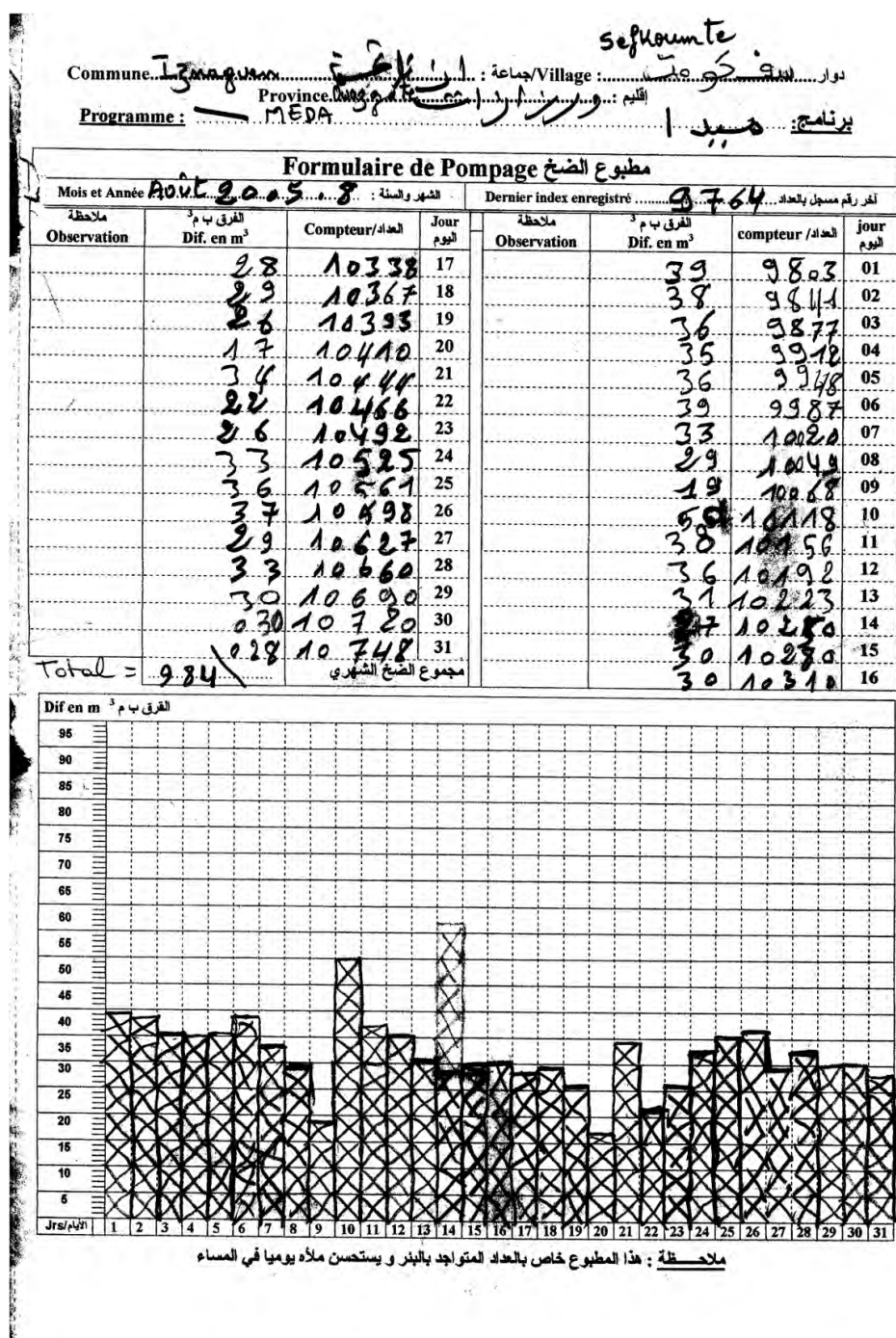


Figura 3: Hoja de toma de datos de un sistema de Marruecos.

## 4.5. Banco de medidas

Los ensayos propuestos en este capítulo precisan de unos medios, que juntos, constituyen el banco de medidas desarrollado en el marco de esta tesis e implementado en el Instituto de Energía Solar. Siguiendo la línea maestra que guía todas las iniciativas del IES en el ámbito de la electrificación rural, los medios utilizados en este trabajo se apartan

de grandes y complicados equipamientos, que precisan para su operación de personal cualificado, amén de su elevado coste. No hay que olvidar que las fuentes de financiación de las que se nutre la electrificación rural no son particularmente poderosas, y que cualquier aumento en los costes de los programas puede desembocar en la no realización de los mismos. Lo propuesto aquí pretende rellenar el espacio intermedio que hay entre la certificación, realizada por organismos con acreditación internacional, y la mera instalación de equipos en el terreno sin ningún tipo de control de calidad.

Es importante subrayar, que, como ya se apuntó en anteriormente, este planteamiento no pretende ni sustituir ni competir con los organismos certificadores oficiales, sino complementarlos. Como ya se dicho en algún otro documento surgido de esta casa, la calidad es más una cuestión de convencimiento de su necesidad, que de los medios disponibles para garantizarla.

Por tanto, la intención es que lo descrito a continuación sea considerado una propuesta para que la comprobación de las especificaciones de calidad pueda ser realizada localmente por los propios países en los que se desarrollan programas de bombeo fotovoltaico.

El banco de medidas consta de una serie de equipos y elementos que presentamos aquí agrupados desde un punto de vista funcional:

- Banco hidráulico: Banco principal de medida en donde se comprueba el funcionamiento del sistema en sus condiciones nominales de trabajo.
- Banco de condiciones anómalas: Elementos utilizados para comprobar las protecciones y el comportamiento de la bomba solar bajo las denominadas condiciones extremas de trabajo (depósito lleno, funcionamiento a altas temperaturas, etc) ya mencionadas en el capítulo 2.
- Máquinas utilizadas en el terreno: Medidores necesarios para comprobar el funcionamiento de los sistemas una vez instalados.

#### **4.5.1. Banco hidráulico**

La primera y básica función de este banco de ensayos consiste en hacer funcionar la bomba en sus condiciones nominales de trabajo, gracias a los siguientes subsistemas y elementos:

- Sistema de mantenimiento de la presión en el circuito.
- Sistema de prueba de ciclado arranque-parada.
- Suministro de potencia.
- Banco hidráulico.
- Medidores para registrar los valores de las magnitudes de interés así como un equipo de registro de datos.

En la figura 4 se puede apreciar un esquema del banco con todos sus elementos.

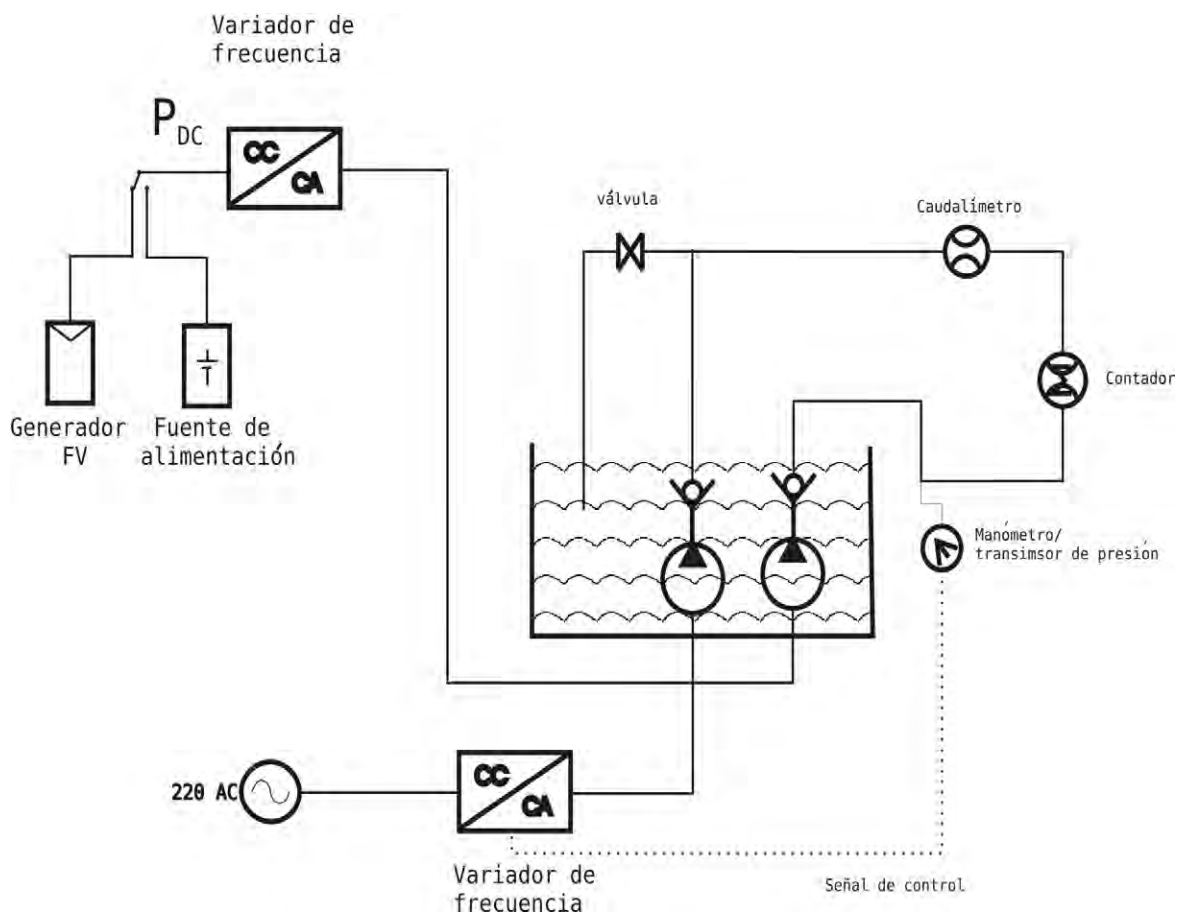


Figura 4: Esquema del banco hidráulico implementado.

A continuación describiremos brevemente cada parte del circuito.

#### 4.5.1.1. Subsistema de mantenimiento de presión de agua

Para hacer ensayos que estén en condiciones reales es necesario conseguir que la altura “vista” por la bomba a lo largo del ensayo permanezca constante, independientemente de la variación de la potencia eléctrica de entrada (normalmente proveniente de un generador fotovoltaico). Podría pensarse en simular la altura estrangulando el paso del agua mediante un grifo. Sin embargo, esta solución no es válida, ya que el resultado es que la presión (altura) conseguida depende del caudal generado por la bomba, que a su vez, depende de las variaciones de la potencia de entrada. En el caso de una bomba alimentada mediante un generador fotovoltaico, la variación intrínseca a la irradiancia procedente del sol, hará que la altura manométrica “vista” por la bomba cambie de la misma manera, cosa que no ocurre en un pozo o sondeo. Entonces, para mantener la presión constante se utiliza otra bomba conectada a la red eléctrica del laboratorio<sup>80</sup>. En la descripción que sigue llamaremos “bomba AC” a la conectada a la red eléctrica, y “bomba solar” a la alimentada con un generador fotovoltaico.

La bomba AC bombea contra la solar, de forma que para que ésta última genere un

caudal distinto de cero, deberá ser capaz de generar una presión que sea superior a la que está generando la primera. Justo ésto es lo que ocurre en un caso real, en el que la bomba impulsará agua cuando la potencia de entrada al sistema sea tal que pueda vencer la presión de la columna de agua que tiene encima. Los circuitos hidráulicos de las dos bombas se unen en un punto para que lo descrito se cumpla. En la figura 4.5 se muestran los circuitos mencionados. Se observa que son importantes las válvulas antiretorno en las dos bombas para evitar que el agua circule en sentido inverso a través de ellas.

Para que este esquema funcione es necesario monitorizar la presión a la salida de la bomba solar y realimentar con esta información la bomba AC para que corrija su empuje. El convertidor acoplado a la bomba AC recibe una consigna de presión, previamente fijada, y aumenta la frecuencia de trabajo si la presión cae por debajo de ella, y lo contrario si aumenta. Esta operación se mantiene gracias al controlador PID disponible en el convertidor.

Con este mecanismo se tiene una bomba trabajando a presión constante.

Este montaje es muy útil para estudiar el comportamiento de una bomba conectada a un generador fotovoltaico y que bombea a una altura dada a lo largo de un día. Con la ayuda de sensores de corriente, tensión, caudal, presión e irradiancia y de un registrador de datos, se pueden obtener parámetros importantes de los sistemas de bombeo, como volúmenes acumulados de bombeo, eficiencias instantáneas de las diferentes partes del sistema, respuesta ante perturbaciones en la potencia de entrada (por ejemplo, paso de nubes), funcionamiento del convertidor DC/AC en distintas condiciones de trabajo (por ejemplo, si utiliza un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia), etc.

#### **4.5.1.2. Banco hidráulico**

Es un circuito cerrado de agua equipado con sensores de medida y elementos varios con los que influir en el caudal que circula a su través, y con los que simular cierta altura manométrica.

Los elementos que lo constituyen son:

- Depósito: Fabricado en fibra de vidrio reforzada. En el caso de nuestro laboratorio tiene una capacidad:  $6'3 \text{ m}^3$  y de base circular.
- Llaves de paso. Las llaves de paso tienen por objeto interrumpir el paso del agua para redirigirla o, en situaciones de mantenimiento en las que sea necesario abrir el circuito en algún punto, para evitar derramamientos de agua. Se utilizan para este menester llaves de bola.
- Grifos. A diferencia de las llaves de paso descritas en el párrafo anterior, este tipo de llaves, tienen más sensibilidad a la hora de regular el paso del agua en el circuito. Por eso son los utilizados para generar la presión a la que se quiere que trabaje la bomba.
- Válvulas antirretorno. Usadas para evitar que el agua circule en un sentido contrario al deseado. Una de sus aplicaciones más habituales es la de evitar que el agua se salga de la tubería de aspiración, utilizada en el caso de las bombas de superficie. Las bombas

sumergibles suelen llevar incorporada una, lo que hace innecesario su instalación en el circuito exterior.

- Tuberías, normalmente de cobre, material muy accesible y con gran variedad de accesorios. Es importante añadir que, si no se van a hacer pruebas a altas presiones (más de 15 bares), las tuberías de PVC son perfectamente válidas, más económicas, e igualmente presentes en todos los mercados. También cuentan con todo tipo de accesorios. Las tuberías, independientemente del material, van a ser necesarias para cualquier modificación o adaptación del circuito dictada por las necesidades de medida. Por ello es importante su facilidad de manejo. En la figura 5 se muestra un montaje hecho ad-hoc para probar dosificadores de cloro.



*Figura 5: Montaje para medida de dosificadores.*

#### **4.5.1.3. Medidores**

En este apartado se describen los dispositivos que miden las magnitudes físicas de interés. Éstas son: presión, caudal y volumen de agua.

- Medidores de presión: Los elementos medidores de presión se clasifican en manómetros (que miden la presión por encima de la atmosférica), vacuómetros (que miden la presión por debajo de la atmosférica) y barómetros (que miden la presión atmosférica). Para medir la presión que es capaz de generar una bomba se utilizan los manómetros. Esta presión es equivalente a la altura de columna de agua que tiene que levantar la bomba. Los manómetros están basados en el principio de Bourdon, consistente en un tubo hueco de cierta aleación de acero. Su interior se llena con el agua bombeada ejerciendo la presión correspondiente. El tubo, que en reposo describe cierta curvatura, se estira al sufrir esta presión en su interior. Mediante un sencillo engranaje mecánico la deformación se transmite a una aguja que indica la presión en un panel calibrado. Los manómetros utilizados indican la presión en bares. Un bar equivale, prácticamente, a 10 metros de columna de agua. El banco de medida está preparado par medir hasta 25 bares, divididos en 3 escalas, como se ve la figura 6.
- Flotámetros. Usados para medir el caudal



*Figura 6: Manómetros utilizados en el banco de medida.*

generado por la bomba. Se hace pasar el agua a través de una conducción transparente de sección variable, en la que hay una pieza (flotámetro) de forma cónica y peso calibrado. El paso del agua levanta el flotámetro dentro de la conducción transparente. La relación entre el caudal y el peso del flotámetro hacen que éste quede suspendido en una posición estable, y gracias a una calibración en el vidrio exterior, se puede leer el caudal que circula en ese momento. Es evidente, por tanto, que estos medidores deben ser instalados en posición vertical para que funcionen correctamente. Son los más sencillos y no necesitan un mantenimiento especial aparte de su limpieza.

- Los caudalímetros magnéticos tienen una hélice en su interior que gira con el paso del agua. En las aspas de la hélice hay fijados unos imanes, y adosado en la pared de la tubería un detector magnético. A mayor caudal, mayor velocidad de giro de la hélice, y por tanto, mayor número de pulsos detectados por unidad de tiempo. La electrónica correspondiente convierte este tren de pulsos en una señal de corriente normalizada en el intervalo de 4 a 20 mA. Comparado con el flotámetro, este tipo de medidor de caudal es ya más específico y se utiliza para hacer medidas continuadas en el tiempo con un registrador de datos asociado.
- Medidores de volumen de agua bombeada. También conocidos como contadores, totalizan la cantidad de agua bombeada, en metros cúbicos, es decir el servicio entregado por el sistema de bombeo. Son iguales a los que se pueden ver en cualquier vivienda para llevar cuenta del consumo de agua. Son económicos y altamente disponibles.

#### **4.5.1.4. Subsistema para el ensayo de ciclado**

A continuación se describe los elementos necesarios para la realización del ensayo de ciclado, presentado en el apartado 4.1.1.2.

El ensayo está caracterizado por la presión de prueba (equivalente a la altura manométrica de bombeo) y el número de ciclos arranque-parada (en el caso de la norma propuesta, 5.000).

Un contador digital lleva la cuenta de arranques y paradas, y un presostato con histéresis, tarado a la presión de prueba, abre y cierra una válvula pilotada por un solenoide conectado a la red eléctrica. Los tiempos de apertura y cierre están controlados por unos temporizadores. La secuencia de eventos es la siguiente: la bomba, que en principio tiene la salida de agua bloqueada por la válvula, arranca y comienza a desplazar el agua inmediatamente. Como la válvula no permite el paso del agua, la presión sube muy rápidamente (teóricamente, y debido a la alta incompresibilidad del agua, de manera instantánea). El presostato, que está midiendo la presión en la boca de la bomba, da orden de abrir la válvula cuando se alcanza una presión prefijada, y se mantiene abierta cierto tiempo gracias a un temporizador disparado en el momento de apertura. Transcurrido otra cantidad de tiempo prefijada, otro relé detiene el bombeo y se inicia una segunda temporización con objeto de que el agua llegue a un completo reposo. Entonces se cierra la válvula de nuevo, para posteriormente arrancar la bomba, repitiéndose todo el proceso. El contador detiene el ensayo cuando se ha llegado al número programado de arranques.



En la figura 7 se muestra el cronograma de los sucesos que tienen lugar en el ensayo. Los tiempos de funcionamiento y reposo de la bomba se fijan teniendo en cuenta la cantidad de agua que maneja la bomba y el tamaño del depósito en donde está alojada. En ningún caso son un factor crítico, y valores en torno a 10 segundos son razonables.

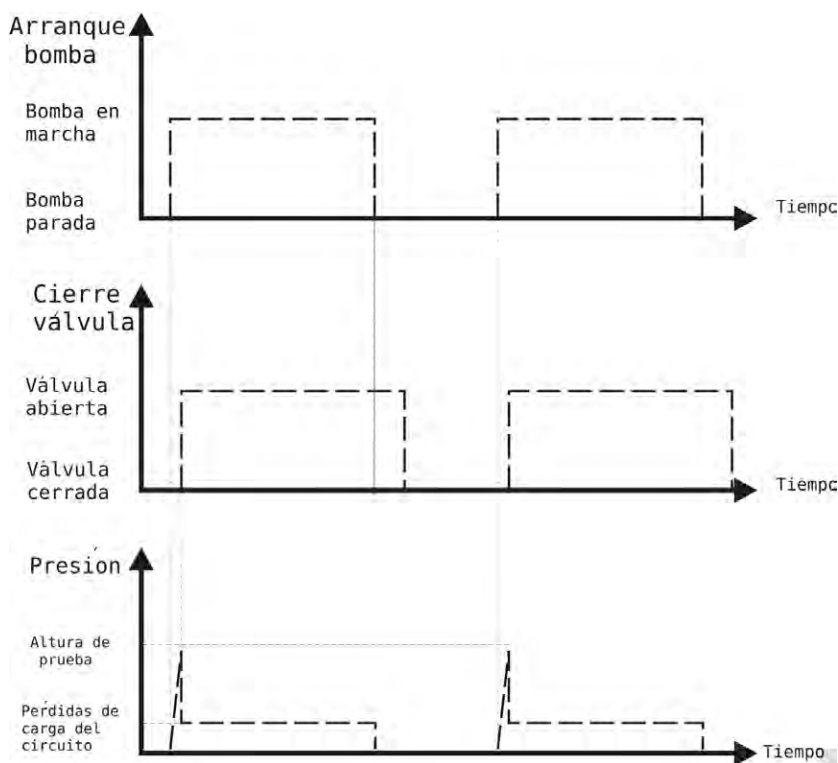


Figura 7 Cronogramas para el ensayo de ciclado.

En la figura 8 se muestra el tramo de tubería en el que está intercalada la electroválvula (en verde) que está cerrada en el momento en que la bomba arranca. El tramo de tubería de goma negra y corrugada sirve para proteger las tuberías contra el golpe de ariete, fenómeno que puede darse en el momento en que la válvula se abre.

#### 4.5.1.5. Suministro de potencia

Se han utilizado tres medios para alimentar las bombas probadas en el banco de medida: generadores solares

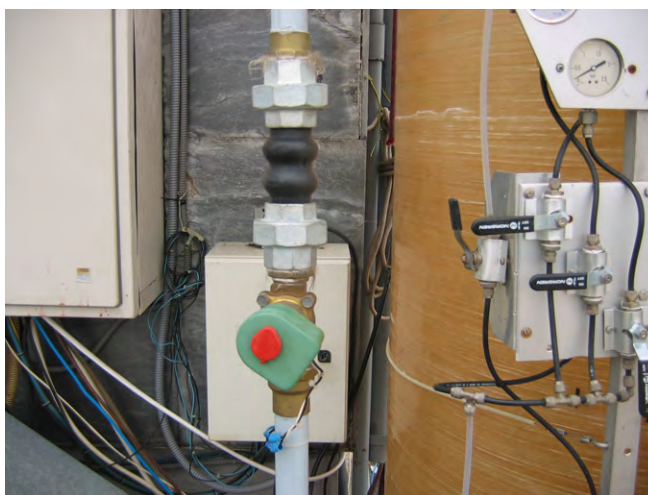
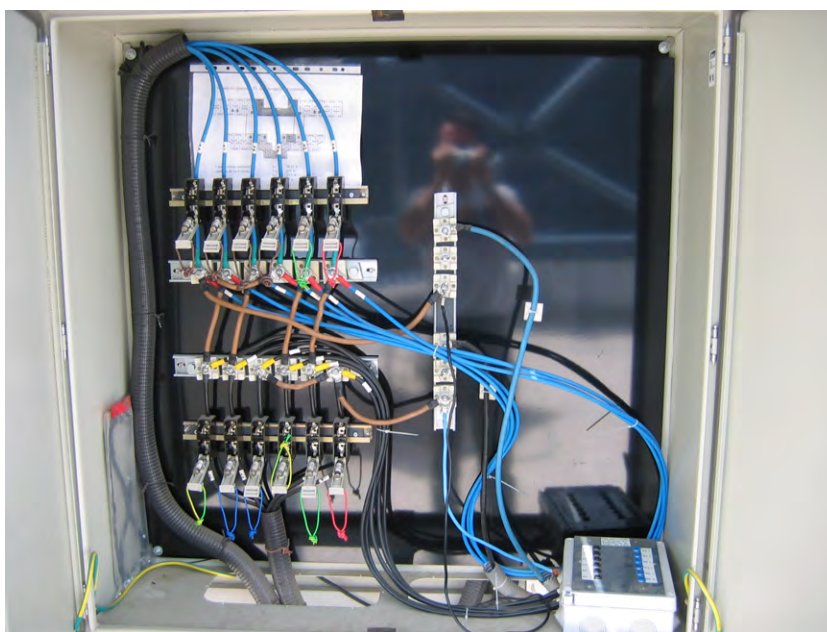


Figura 8: Electroválvula y tramo de tubería anti-golpe de ariete (en negro) para el ensayo de ciclado.

fotovoltaicos, fuentes de alimentación y la red eléctrica.

El generador fotovoltaico disponible en el Instituto de Energía Solar está instalado de forma que es posible una gran flexibilidad en su configuración, lo que permite utilizarlo para alimentar sistemas de bombeo en un amplio rango de potencias y tensiones de entrada. En la figura 9 se puede ver el cuadro de paralelos del generador. Al utilizar un generador fotovoltaico se pueden estudiar las peculiaridades asociadas al suministro de potencia por parte del sol, como son la variación de la irradiancia recibida y la presencia de nubes. También permite estudiar el comportamiento de los sistemas al comienzo o final del día, o la influencia de la temperatura ambiente en la cantidad de agua bombeada.

Pero a veces, es deseable tener independencia de las inclemencias meteorológicas para hacer medidas. En este caso se utiliza una fuente de alimentación en corriente continua. Dadas las potencias que se están alcanzando en los sistemas de bombeo actuales, las



*Figura 9: Cuadro de paralelos del generador fotovoltaico situado en la azotea del IES*

fuentes adecuadas caen ya en el rango de las más potentes del mercado. Las tensiones necesarias están llegando al kilovoltio, y con corrientes que superan los 6 amperios.

Por último, siempre es conveniente tener disponible la red eléctrica, ya que al fin y al cabo los motores utilizados casi en su totalidad son asíncronos de alimentación en AC. Incluso los convertidores de frecuencia, prácticamente ubicuos en los sistemas de bombeo actuales, son diseñados para su funcionamiento en AC. Por lo tanto, siempre se podrán conectar a la red para hacer pruebas puntuales, por ejemplo a frecuencia constante e igual a 50 Hz, (en el caso de Europa) que es la frecuencia nominal de los motores asociados a las bombas.

## **4.5.2. Banco de medidas en condiciones extremas**

### **4.5.2.1. Cámara climática**

Bajo este epígrafe se describe brevemente no solo la cámara en sí, sino los accesorios que han sido necesarios para realizar la prueba de trabajo a altas temperaturas a que se han sometido a los convertidores DC/AC.

La cámara climática, en sí misma, es un cobertizo adquirido en los comercios habituales y que se vende, entre otros usos posibles, para colocar en el jardín y guardar en él todos los accesorios de jardinería. Una vez más se aprovechan elementos económicos y accesibles frente a complejos equipamientos. Para garantizar su aislamiento térmico, se forra el interior con una capa de poliespán de 10 centímetros de grosor, y después se cubre con planchas de aluminio para protegerlo. Ver la figura 10.



*Figura 10: Cámara climática con un armario de control de un sistema de bombeo en su interior, preparado para el ensayo de trabajo a altas temperaturas.*

El calor es generado por un calefactor comercial alimentado por un equipo electrónico que funciona en lazo cerrado. Mediante este equipo se programa la temperatura deseada de trabajo. Funciona calentando el interior de la cámara hasta alcanzar dicha temperatura, manteniéndola durante todo el tiempo que dura la prueba. En el interior de la cámara climática también hay un humidificador, de los utilizados a nivel doméstico, controlado en lazo cerrado mediante un sensor de humedad en el interior de la cámara. El esquema de

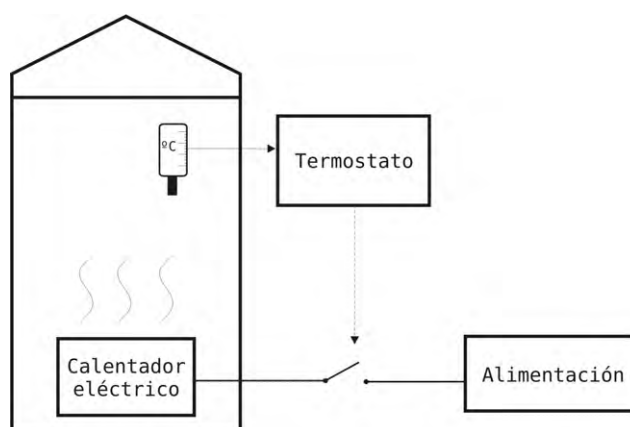


Figura 11: Esquema de funcionamiento.

la figura 11, representa lo descrito.

### 4.5.3. Máquinas de medida en el terreno

#### 4.5.3.1. Caracterización de generadores

La comprobación de la potencia pico del generador es una de los ensayos más importantes que hay que realizar para comprobar el buen funcionamiento del sistema. Para hacer este ensayo hemos utilizado una carga capacitiva diseñada y fabricada en el laboratorio del IES<sup>78</sup>.

El principio de funcionamiento se basa en la carga, por parte del generador, de un condensador del tamaño adecuado. El condensador, descargado, se conecta al generador, iniciándose la carga mediante un interruptor (IGBT). Cuando el interruptor se cierra, el generador entrega su corriente de cortocircuito inmediatamente haciendo que la tensión del condensador aumente. Al cabo de cierto tiempo el condensador se carga llegando a la tensión de circuito abierto del generador, haciéndose cero la corriente. Este transitorio es registrado, teniéndose entonces todos los puntos intermedios entre el comienzo de la carga ( $V = 0$ ,  $I = I_{sc}$ ) y su final ( $V = V_{oc}$ ,  $I = 0$ ).

Las figuras 12 y 13 muestran el principio de medida. En la gráfica de la derecha se detalla la evolución temporal de la tensión y la corriente durante el proceso de medida. El tiempo que dura la carga del condensador es función del valor de su capacidad y de la tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito del generador.

Las curvas representadas se registran mediante un osciloscopio digital, y después se representa la corriente en ordenadas y la tensión en abscisas, y teniendo así la curva I-V del generador.

Aparte de la carga propiamente dicha y el osciloscopio, hay otros elementos importantes para la realización de la medida: un módulo calibrado en tensión y corriente para utilizarlo como sensor de irradiancia y de temperatura de célula, un ordenador para grabar y procesar las curvas y voltímetros (para medir la tensión y corriente en el módulo

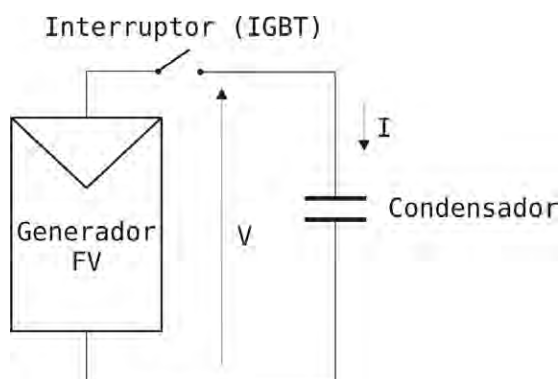


Figura 12: Circuito de medida con una carga capacitiva.

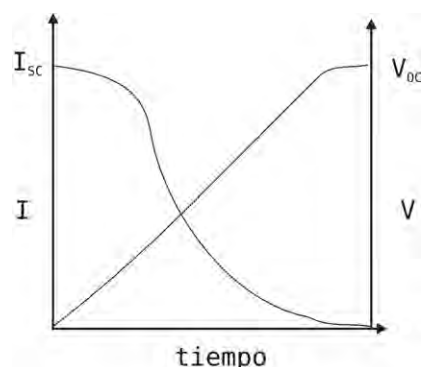


Figura 13 : Evolución de la tensión y la corriente durante la medida.

patrón).

El procedimiento de medida es como sigue: se coloca el módulo en el plano del generador y se deja pasar el tiempo necesario para que adquiera las mismas condiciones de temperatura que los módulos del generador; una vez transcurrido, se hace la medida con la carga, anotando a la vez la irradiancia incidente y la temperatura de célula. Posteriormente, se corrige la curva I-V obtenida teniendo en cuenta las condiciones de medida para conseguir la curva extrapolada a condiciones estándar de medida.

El resultado de la medida es la potencia del generador en condiciones estándar.

#### 4.5.3.2. Caracterización de pozos o sondeos

Entre los ensayos a realizar para garantizar el buen funcionamiento de los sistemas, están los realizados sobre el terreno a los sistemas ya instalados. Como ya se ha descrito, en varios de ellos, es necesario medir la distancia entre el nivel de agua en el pozo y su salida al exterior en el brocal del pozo.

Pues bien, para la medida de estas magnitudes, se ha fabricado un medidor que sigue los principios en los que se basan los comerciales, pero que, otra vez, resultan más económicos.

Para la medida del nivel de agua hasta el borde del pozo, en el caso en que éste sea abierto, hemos tomado un cable bifilar y un carrete prolongador para tomas de pared, y hemos construido uno que aparece mostrado en la fotografía.

El principio que sigue se basa en cerrar un circuito eléctrico cuando el cable llega a la superficie del agua. Para ello lleva un relé Reed en el extremo y una sencilla linterna acoplada al carrete en el otro extremo. Como precaución adicional se midió el coeficiente de elasticidad del cable cargándolo con un peso considerablemente mayor del que se esperaba que iba a soportar, sin ningún estiramiento apreciable. Para facilitar la lectura el cable lleva una marca por metro.

Pero hay casos en los que el pozo no es abierto si no que se trata de sondeos en los que la empresa que los ejecuta los remata, con buen criterio por lo demás, cubriéndolos completamente, o con orificios que no son del tamaño adecuado para introducir el medidor. Si es posible conocer con antelación estos casos, se puede pedir previamente (en la fase de especificaciones) que se coloque un tubo de plástico de 6 mm de diámetro fijado a la tubería de subida y de forma que el extremo inferior quede abierto y a la altura de la toma de succión de agua de la bomba, y el superior quede accesible en la superficie. Con este dispositivo instalado, se toma una bomba de aire de las utilizadas para hinchar las ruedas de bicicleta y un manómetro y se conectan al tubo de la manera mostrada en la figura 15.



Figura 14: Dispositivo de medida del nivel de agua en pozos o sondeos.

La medida se hace bombeando el interior del tubo de plástico hasta que se ve que la presión en el manómetro no aumenta aunque se siga bombeando. Esta situación es debida a que se ha conseguido vaciar de agua completamente el tubo. La presión que indica el manómetro es la ejercida por la altura de agua que hay hasta el extremo del tubo. La situación se mantiene gracias a una válvula que impide que el aire bombeado salga por el extremo superior. La presión mencionada, y convenientemente traducida a metros, es la distancia que hay entre el nivel de agua en el pozo y la bomba.

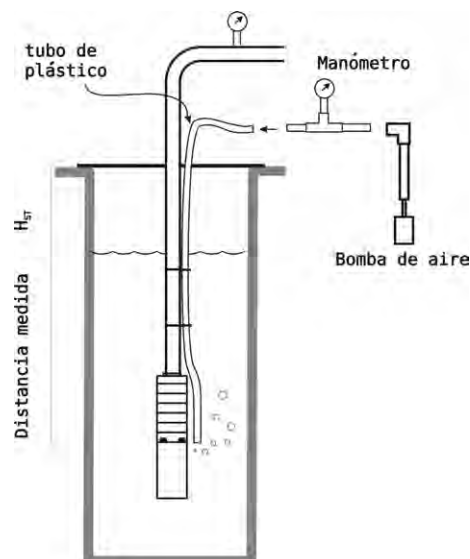


Figura 15: Esquema de funcionamiento del sistema de medida de la columna de agua que hay por encima de la bomba.

La utilidad de esta medida está supeditada al conocimiento de la profundidad a la que

está instalada la bomba. La distancia del borde del sondeo al nivel del agua dentro del pozo se obtiene restándole a la profundidad de instalación dicha, la distancia medida con este dispositivo casero.

## **4.6. Conclusiones del capítulo**

A lo largo del capítulo se han descrito los procedimientos de ensayo propuestos para verificar las especificaciones presentadas en el capítulo 2. En primer lugar se han reordenado éstas para ajustarlas al orden en que es más probable que se ejecuten estos procedimientos, y que coinciden con las etapas de ejecución de un proyecto de bombeo.

Los ensayos de cada elemento por separado se centran principalmente en la verificación de su robustez dependiendo de las condiciones finales de trabajo. Por ejemplo, son de gran importancia los ensayos de trabajo en condiciones extremas (alta temperatura) y los de durabilidad, especialmente para las bombas de desplazamiento positivo (ciclado).

Por otro lado, los ensayos de los prototipos en conjunto van a servir, por un lado, para verificar que el servicio de los sistemas propuestos está de acuerdo con las necesidades propuestas en algún momento previo en el desarrollo del proyecto, y por otro, estos ensayos van a comprobar la calidad de la integración de los distintos componentes del sistema. Gracias a estos ensayos se hacen visibles problemas de integración, por ejemplo y principalmente, entre convertidor de frecuencia y la motobomba.

Se ha descrito cada ensayo, incluyendo los pasos para su realización y los materiales utilizados. Respecto a esto, consideramos importante resaltar que se ha intentado, en la medida de lo posible, que fuesen de fácil acceso y coste razonable. En general, para garantizar la calidad en este tipo de sistemas, no son necesarios equipos sofisticados, y en consecuencia caros, tanto en términos de precio, como en el del personal necesario para su realización.

## Capítulo 5

# Aplicación del control de calidad a un proyecto regional de bombeo fotovoltaico. Lecciones aprendidas

---

### 5.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es mostrar la aplicación práctica de la estrategia diseñada para el control de calidad en la implementación de programas de bombeo fotovoltaico. El proyecto “Implementation of a PV Water Pumping Programme in Mediterranean Countries”, financiado por la Unión Europea (UE) (dentro de su programa MEDA) y la Agencia Española de Cooperación Internacional, ha sido la oportunidad para ello. En este capítulo se particularizarán los pasos propuestos en los capítulos anteriores para un proyecto real. Además se hará especial énfasis en los ensayos sobre el terreno por un lado, y en la gestión y operación de los sistemas por otro. Los resultados y observaciones surgidos tras el análisis de estas dos cuestiones van a suponer el grueso del capítulo.

Tienen también cabida aquellos aspectos inesperados que se manifiestan solamente cuando se realizan las instalaciones y que enfrentan al ingeniero a problemas relacionados con el funcionamiento de todos los equipos en conjunto, y en su escenario final. Lo que en entornos ingenieriles es también conocido como problemas de integración. Todo esto es muy difícil de predecir en el laboratorio o en las especificaciones, pero una vez sucedido, observado y aprendido pasa a formar parte del zurrón de la experiencia de los protagonistas, convirtiéndose éstos últimos, gracias a ello, en actores experimentados en estas lides. Por citar ejemplos, se puede mencionar el asunto del rebosadero de los depósitos, relacionado con los modos y usos heredados de los sistemas de bombeo diesel,



y sobre el que mostraremos ahora ejemplos concretos, o la aparición del fenómeno del golpe de ariete en algunos pueblos debido a características particulares de los mismos.

En lo referente a la gestión de los sistemas, nos encontramos con una casuística muy rica, que por su estrecha relación con la sociedad receptora de los sistemas de bombeo, está intrínsecamente ligada a la realidad particular de cada comunidad. A pesar de ello, de esta realidad se pretende extraer lo que de generalizable tenga para proyectos futuros.

Por todo ello, lo descrito en este capítulo tiene especial valor, porque muestra la distancia que hay entre una idealización, inevitable por lo demás, y la realidad. Dicho con otras palabras, estamos hablando de pasar del plano de la teoría al de los hechos, cosa que siempre es muy instructiva. También en el caso de los sistemas de bombeo fotovoltaico en entornos aislados.

## **5.2. El proyecto**

### **5.2.1. Descripción**

El proyecto que nos ocupa se encuadra dentro del denominado por la Unión Europea, programa MEDA cuyo objetivo general es ayudar a los países mediterráneos a reformar sus estructuras económicas y sociales. Los países incluidos en este programa son: Argelia, Chipre, Egipto, Israel, Jordania, Líbano, Malta, Marruecos, Siria, Territorios Palestinos, Túnez y Turquía.

Junto con la Unión Europea, la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) ha colaborado también en la financiación de este proyecto mediante el llamado Programa Azahar.

Las características generales del proyecto son:

- Instalación de un total de 52 sistemas de bombeo fotovoltaico, repartidos de la siguiente manera: 29 en Marruecos, 10 en Argelia y 13 en Túnez. El concurso público internacional que se convocó como parte de las exigencias de la Unión Europea, fue ganado por la empresa ISOFOTÓN, que fue quien realizó las instalaciones.
- Potencia total instalada de 2573 kWp.
- Los criterios principales de selección de los emplazamientos han sido, principalmente, lejanía de la red eléctrica y, al mismo, tiempo, proximidad entre ellos, para crear una masa crítica de sistemas que facilite el mantenimiento posterior.
- El agua bombeada ha sido utilizada para consumo humano (73 % de los sistemas), aprovisionamiento para el ganado (17 %) e irrigación (10 %). Respecto a los sistemas de irrigación, es importante destacar que una buena parte de ellos han venido a reforzar “foggaras”, descritas en el capítulo 1, que se han secado debido a una prolongada sequía sufrida en los últimos años. Esto es particularmente

interesante en lo referente a la aceptación de los sistemas, ya que heredan los esquemas organizativos que tienen estas milenarias infraestructuras de riego.

- La instalación de los sistemas ha tenido como prerequisite la constitución (o detección) de una estructura social que sustente las tareas de gestión y mantenimiento.
- El proyecto se ha ejecutado en estrecha colaboración con las organizaciones locales encargadas del desarrollo rural en cada país.

En el contexto particular del Instituto de Energía Solar, y para el caso concreto de Marruecos, el proyecto constituye la continuación de un extensa actividad comenzada hace 10 años en la que la búsqueda de un paradigma de electrificación rural descentralizada es el eje principal, y el bombeo fotovoltaico una de sus aplicaciones concretas más importantes.

## 5.3. Aspectos relevantes

### 5.3.1. Contrapartes locales

En la mayoría de los casos uno de los primeros pasos ante la ejecución de un proyecto, antes incluso de redactar las especificaciones, es encontrar compañero de viaje, especialmente si se va a realizar en un país que no es el propio.

En el caso del proyecto MEDA, una vez encontradas las contrapartes locales con las que trabajar en cada país, las responsabilidades que les correspondieron fueron las siguientes:

- Titularidad de los sistemas instalados.
- Definición de las tarifas a aplicar en cada sistema.
- Control de la recaudación del dinero desembolsado por los usuarios como contraprestación por el servicio de agua prestado.
- Custodia de los repuestos previstos en el proyecto.

En el caso de Marruecos, la contraparte es una organización no gubernamental llamada *Tichka*, con la que el IES lleva trabajando desde que inició su andadura en el sur de Marruecos. Esta ONG es de carácter local aunque, para reforzar la idoneidad de la elección, se añade aquí que es ampliamente reconocida a escala nacional.

En Argelia se trata del “*Centre de Développement des Energies Renouvelables*” (CDER) en cada una de las regiones en las que se ha implantado el proyecto, Adrar, Djelfa, Laghouat y Naama. El CDER tiene una organización distribuida y es cada delegación regional la que asume las responsabilidades ya mencionadas. En el caso concreto de Djelfa, ha participado también el “*Haut-Commissariat pour le développement de la Steppe*” (HCDS), organismo muy asentado y de gran prestigio en el ámbito rural en la región.

En Túnez la situación es similar a la de Argelia. El organismo competente es la “*Agence Nationale pour la Maîtrise de l’Energie*”, (ANME). También tiene sus delegaciones locales para las que son válidos los mismos comentarios. Ha participado también un organismo de extendida implantación en el medio rural, el CRDA (“*Centre Rural de Développement Agricole*”).

### **5.3.2. Comunidades beneficiarias**

Los requisitos generales exigidos a las comunidades beneficiarias de los sistemas a instalar por el proyecto son:

- una población de 500 habitantes aproximadamente,
- carecer de acceso a la electricidad,
- padecer problemas de disposición de agua de calidad suficiente,
- disponer, a cambio, de una fuente de agua capaz de abastecer a la comunidad.
- y, adicionalmente, se pedía que las comunidades estuviesen agrupadas para favorecer el mantenimiento y facilitar la réplica de los sistemas en el futuro.

En cada país, la contraparte correspondiente propuso una lista de emplazamientos posibles que cumplieran los condicionantes genéricos anteriores, y otros más concretos, como poseer o estar en condiciones de habilitar las infraestructuras necesarias para albergar los sistemas (pozo, depósito de agua, y red de distribución) y existir una organización social (y si no, crearla) encargada de la gestión del agua.

Merece la pena emplear el mayor tiempo posible en estudiar cuál es, y cómo esta gestionado, el sistema previo de suministro de agua y las modificaciones que puede introducir en el mismo la instalación del nuevo sistema. No es el momento de hacer una discusión extensa acerca de este asunto, pero es importante decir que no son pocos los sistemas que han fracasado por no tener en cuenta estos aspectos<sup>81</sup>. En el caso de este proyecto, en el que se han sustituido un gran número bombas diesel por bombas fotovoltaicas, este estudio ha sido relevante y ha permitido detectar y corregir vicios técnicos heredados del “sistema diesel”, como más adelante se detalla.

Cada contraparte propuso una lista de candidatos, en la que se ofrecían los datos más relevantes del punto de agua involucrado. En la figura 1, se puede ver un ejemplo de los datos que poseía la delegación de Gabes, en Túnez, de uno de los sondeos propuestos para el proyecto. Se puede observar que los datos son aparentemente muy exhaustivos (se dan datos como los kilómetros de carretera asfaltada y de pista, diámetro del sondeo, número de cabezas de ganado que abreven, nivel estático, etc.), lo cual es señal, simplemente, de que la gestión puede ser buena. Se puede apreciar que la información aportada es abundante, lo que no quiere decir que se ajuste a la realidad. Ni que deje de hacerlo. Es importante hacer, como fue nuestro caso, visitas de replanteo para confirmar los datos aportados.

**FICHE SIGNALÉTIQUE**

**Pompage de l'eau par énergie solaire photovoltaïque**

1) SITE : M. Guitla  
 IMADA : M. Guitla DELEGATION : Elhamma GOUVERNORAT : GABES

2) ÉLOIGNEMENT DU CHEF LIEU :  
 Route Goudronnée : 38 km  
 Piste : 16 km  
 Accès facile (X) Accès difficile ( )

3) SITUATION DU POINT D'EAU SUR LA CARTE :  
 Coordonnées : X : 37 40 55 Y : 8 09 50 Altitude : 160 ✓

4) CARACTERISTIQUES DU POINT D'EAU :

Sondage (X)	Puits de surface ( )
Fiche de réception*	Diamètre intérieur : ..... m
N° IRI : <u>19161</u>	Diamètre extérieur : ..... m
Diamètre du tubage : <u>9" 5/8</u>	Hauteur margelle : ..... m
Niveau statique : <u>101</u> m	
Profondeur : <u>175,5</u> m	
Franche d'eau : ..... m	
Volume : ..... m <sup>3</sup>	
Débit spécifique : <u>2</u> l/s/m	
Rabatement : <u>1</u> m à <u>2</u> l/s	
Salinité : <u>3,480</u> g/l	

5) QUALITÉ DE L'EAU

Analyses chimiques* :	Résultats disponibles	oui (X)	non ( )
Analyses bactériologiques* :	Résultats disponibles	oui ( )	non (X)
Eau potable (X)	Non Potable ( )		
Puits ouvert ( )	Puits couvert (X)		

6) POPULATION ENVIRONNANTE DU POINT D'EAU :

NOMBRE DE FAMILLES : 72 NOMBRE D'HABITANTS : 420

CHEFTEL :

OVINS : 1500 BOVINS : ..... EQUINS : 20 CAMELIDES : 200

7) CONSOMMATION ESTIMÉE : 35 m<sup>3</sup>/j

8) INFRASTRUCTURE DE BASE :

Réservoir (s) : oui (X) non ( ) Capacité : 50 m<sup>3</sup>

Dimensions : Diamètre intérieur : 4 m Hauteur : 5 m

Éloignement du point d'eau : 202 m 70 m (GPS) d?

Équipement existant : Motopompe diesel (X) Motopompe électrique ( ) Éolienne ( ) Autres ( )

9) ÉLOIGNEMENT DU RESEAUX :

Figura 1: Datos aportados por el ANME de Túnez sobre un sondeo de la región de Gabes

### 5.3.3. Estandarización de los sistemas

En el programa de bombeo que estamos presentando en este capítulo, se ha realizado la instalación de 52 sistemas de bombeo en 3 países distintos. La gestión de un proyecto de

este tamaño genera una serie de problemas que son más fácilmente abordables si se hace una estandarización de los sistemas. Ésta también permite alcanzar un alto grado de calidad a precios razonables. Por contrapartida, la estandarización dificulta la adaptación de los sistemas a cada población concreta. La estrategia adoptada consiste, pues, en definir un número suficiente de sistemas tipo de forma que se cubran todas las necesidades de los emplazamientos en donde van a ser ubicados. Ésta es la solución más adecuada para programas de tamaño medio o grande por diversas razones:

- Se simplifica la tarea de gestión, transporte de materiales e instalación.
- Se facilita la tarea de mantenimiento al reducirse apreciablemente la variedad de los equipos involucrados.
- Se facilita también el almacenamiento y clasificación de equipos durante la instalación y, también después, al gestionar los equipos de repuesto.

Como se ha mencionado, podría argüirse que esta aproximación conduce a que los sistemas instalados en cada comunidad no se ajusten exactamente a sus necesidades concretas. En este programa se ha resuelto sobredimensionando los sistemas, y ello por dos razones. Una, porque el coste del generador fotovoltaico frente al coste total del sistema, no representa más que el 17% del precio total de la instalación<sup>28</sup>. Y otra porque el consumo de agua por persona y día, invariablemente aumenta cuando el nuevo sistema de abastecimiento reduce el esfuerzo empleado en su extracción, que es lo que pasa en todos los casos cuando se introduce un sistema de bombeo fotovoltaico. Esto nos ha llevado a considerar consumos de entre 45 y 55 litros por persona y día.

El criterio a la hora de estandarizar los sistemas ha sido el servicio diario entregado expresado en metros a la cuarta potencia ( $m^4$ ) por día. Los valores concretos se muestran en la tabla 1.

<b><i>SISTEMA TIPO</i></b>	<b><i><math>m^4/día</math></i></b>	<b><i>Punto de trabajo tipo (<math>m^3</math>, <math>m</math>)</i></b>
MEDA 1	850	(20 , 43)
MEDA 2	1.750	(30 , 58)
MEDA 3	2.600	(30 , 86)
MEDA 4	5.500	(46, 120)

Tabla 1: Cuantificación de los sistemas

#### 5.3.4. Especificaciones técnicas

En buena medida, este programa ha sido el laboratorio que ha forjado la propuesta de especificaciones técnicas que han sido recogidas en los capítulos anteriores de esta tesis. Es importante añadir que esta aproximación hacia el aseguramiento de la calidad en los sistemas no exige la acreditación oficial de los laboratorios que puedan llegar a ejecutar estos controles. De hecho, el laboratorio del Instituto de Energía Solar, a pesar de no contar con capacidad de certificación internacionalmente aceptada, mantiene una actividad

continúa de ensayo y medida de componentes de sistemas fotovoltaicos (generadores, luminarias, reguladores, baterías, inversores, y, desde la realización de este proyecto, bombas de agua) basados en procedimientos y equipos de medida realizados con medios accesibles a cualquier organización.

En el anexo I, se incluyen las especificaciones técnicas utilizadas en este proyecto MEDA y que formaron parte del pliego de condiciones del concurso público internacional de adjudicación de las obras de instalación.

## **5.4. Procedimientos de ensayo**

Este proyecto MEDA ha servido para poner en práctica los procedimientos de ensayo diseñados en el capítulo 4, que a su vez, sirven para verificar el grado de adhesión de un sistema de bombeo concreto a las especificaciones enumeradas en el capítulo 2. Como se expuso en el capítulo 4, los ensayos se dividen en ensayos en el laboratorio y ensayos “in situ”. A continuación se muestran los resultados de estos ensayos para el caso del proyecto que nos ocupa.

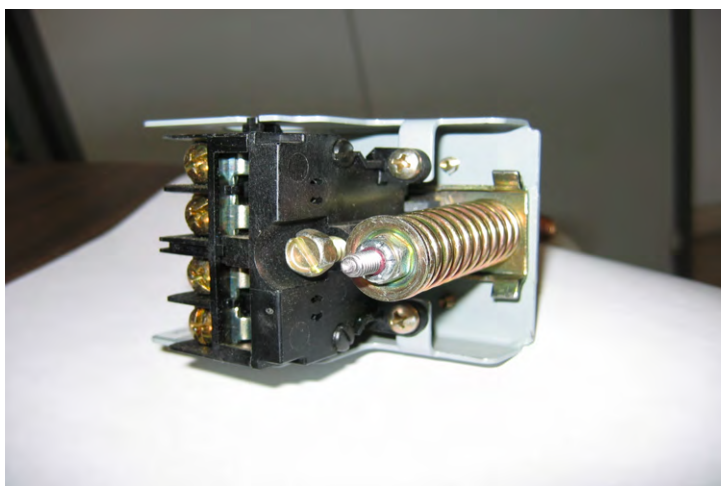
### **5.4.1. Ensayos en el laboratorio**

La empresa ganadora del concurso público fue requerida a entregar un prototipo de cada sistema propuesto para su medida y comprobación en el laboratorio. Los equipos, de forma aislada, superaron el filtro previo que suponen las especificaciones técnicas de componente, cumpliendo las exigencias mínimas que garantizan una operación fiable. Aún así, todos los componentes del sistema de bombeo se probaron en el laboratorio para detectar posibles problemas cuando se asocian entre sí para constituir el sistema de bombeo completo.

En las figuras 2 y 3 se muestran como ejemplo dos elementos constituyentes de un sistema de bombeo FV entregados para su ensayo y verificación.



*Figura 2: Bombas utilizadas en el proyecto MEDA ordenadas por tamaño.*



*Figura 3: Presostato encargado de detectar la elevación de la presión en la cabeza del pozo cuando la boya cierra la entrada del agua en el depósito. La tuerca que se encuentra en el extremo del muelle sirve para tarar el presostato a la presión deseada.*

El ensayo principal fue el que comprobaba que los 4 tipos de sistema estándar definidos por el proyecto, suministraban el servicio asignado. Tras este, los siguientes fueron los que verificaban un comportamiento correcto ante las situaciones anómalas de funcionamiento, y por último se realizó una inspección funcional y visual de los accesorios, con especial atención a aquellos que podrían ser determinantes en la seguridad en el servicio proporcionado, como por ejemplo, los sensores de nivel (boya) o de presión (presostato).

#### **5.4.1.1. Ensayo de servicio**

En este ensayo se comprobó que el sistema era capaz de suministrar la cantidad de agua

para la que estaba diseñado. El ensayo ha sido descrito en el capítulo 4, al cual referimos al lector. A continuación (tabla 2) se muestran los resultados de las medidas llevadas a cabo en cada sistema tipo.

<i>Sistema estándar</i>	<i>Altura ensayo (m)</i>	<i>Servicio diario exigido (m<sup>4</sup>)</i>	<i>Servicio diario medido (m<sup>4</sup>)</i>
MEDA 1	43	850	1025
MEDA 2	58	1750	1815
MEDA 3	86	2600	2677
MEDA 4	120	5500	7584

Tabla 2: Resultado de la medida de servicio para cada uno de los cuatro prototipos.

Como se ha dicho, para la verificación del servicio se tomó como referencia el día solar estándar (IEC 61725), y la bombas se alimentaron con el generador FV disponible en el IES.

#### 5.4.1.2. Ensayo en condiciones de operación anómalas y extremas

Siguiendo igualmente los ensayos descritos en el capítulo 4, se simulaban las condiciones de pozo vacío y de depósito lleno. El primero, consistente en hacer bombear a la motobomba fuera del agua y la segunda en detener el bombeo abriendo la conexión del presostato. En estas pruebas, es importante comprobar la temporización del PLC. Los valores establecidos en el proyecto fueron:

- Tiempo espera en caso de pozo vacío: 10 minutos
- Tiempo espera en caso de depósito lleno: 2 horas

El motivo que conduce al establecimiento de estos valores está basado en la experiencia ganada en los proyectos previos realizados en Marruecos y que indica que, para evitar oscilaciones de arranque-parada de la bomba, estos tiempos son razonables. Para el caso del pozo vacío, la incertidumbre es mayor pues depende de las características particulares del pozo, como permeabilidad del terreno, capacidad de acumulación, etc. Por lo tanto, es importante observar el funcionamiento del sistema, especialmente en época de sequía, e intentar caracterizar el tiempo de recuperación del pozo.

De las pruebas de trabajo en condiciones extremas, a saber, ciclado arranque-parada y trabajo a altas temperaturas, la primera, al tratarse de bombas centrífugas no tenía justificada su realización pues, a diferencia de las de desplazamiento positivo, las bombas centrífugas no están sometidas a picos de esfuerzo en el arranque.

Y en lo concerniente a la prueba de trabajo a alta temperatura, los convertidores DC/AC fueron la parte del sistema sometida a esta prueba. El ensayo, como fue descrito en el capítulo 4, consistió en hacerlo trabajar a 50°C durante una hora en sus condiciones



nominales (ver figuras 4 y 5), es decir, a 50 Hz de frecuencia y a la altura correspondiente al sistema estándar correspondiente (MEDA 1,..., MEDA 4). Tras la prueba y consiguiente constatación de la ausencia de desperfecto visible alguno, se repitió el ensayo de servicio para detectar los invisibles, y que podían manifestarse en forma de un servicio insuficiente. En todos los casos, el resultado de la prueba fue satisfactorio.

Aparte de lo mencionado, estos ensayos permitieron la detección y corrección de problemas menores en algunos componentes del armario de control. Por un lado la sustitución de tarjetas de alimentación usadas para los ventiladores, que presentaban un conexionado inadecuado para las altas tensiones presentes en el sistema tipo más grande (MEDA 4). Y por otro la inclusión de alguna técnica para alargar la vida de los relés de actuación del convertidor DC/AC. En el amanecer y el ocaso, en donde el generador fotovoltaico ofrece tensión suficiente para el arranque de equipos, pero no así potencia, se tiene como resultado un repetido intento de arranque. Con un sencillo algoritmo implementado en el PLC (encargado de temporizar las paradas de bombeo por depósito lleno y pozo vacío) se limitó drásticamente el número de intentos. Básicamente, el algoritmo consiste en contarlos, y si tienen lugar cinco de ellos seguidos en el intervalo de tiempo de 1 minuto, se espera 10 minutos para volver a intentar el arranque. De esta manera se alarga considerablemente la vida de los relés.



*Figura 4: Convertidor trabajando a alta temperatura*



*Figura 5: Temperatura de trabajo*

### **5.4.2. Ensayos sobre el terreno**

Lo encontrado al realizar las visitas al terreno se va a presentar siguiendo, en la medida de lo posible, la presentación de las especificaciones realizada en el capítulo 2. Como es de esperar no todo lo referido allí tendrá su correspondencia aquí debido a que, por un lado, habrá especificaciones que no apliquen en este proyecto concreto, y por otro, a que la realidad del terreno permite medir/verificar menos elementos de los deseados debido a imprevistos de todo tipo: meteorológicos, logísticos, de operación de los bombeos y de interacción con los usuarios de los sistemas. Los ensayos sobre el terreno tuvieron lugar en dos campañas, la primera, realizada a la finalización de las instalaciones y la segunda luego de, aproximadamente, un año de funcionamiento de los sistemas. La última campaña coincidió con el periodo de Ramadán lo cual supuso una afortunada casualidad en términos de eficiencia en el trabajo realizado, ya que redujo al mínimo las hospitalarias costumbres del mundo árabe, que no por apreciadas y agradecidas, dejan de ser largas en el tiempo. Gracias a ello fue posible la visita y verificación de hasta 3 sistemas al día.

#### **5.4.2.1. Capacidad de suministro de los sistemas**

En cada visita se anotaron los niveles estático y dinámico del agua. El primero se midió con el bombeo parado, y el segundo con el sistema en funcionamiento el tiempo suficiente para que alcanzara un valor estable. Para comprobar si el suministro del sistema estaba de acuerdo con lo especificado, fue necesario el nivel dinámico solamente, pero la medida del nivel estático era útil para tener una idea aproximada del comportamiento del pozo, lo que, a su vez, podía dar indicios de problemas de pozo vacío. Los detalles del ensayo se pueden consultar en el capítulo 4. Aquí simplemente conviene subrayar que la bomba tenía que estar trabajando en el entorno del mediodía, que era cuando el caudal de bombeo era máximo.

A continuación se presentan los resultados de estas medidas para los casos de los sistemas medidos en el proyecto. Como se dijo al comienzo de este apartado, no siempre fue posible la realización de este ensayo debido a circunstancias de diversa índole: irradiancia insuficiente por nubosidad<sup>1</sup>, problemas logísticos, etc.

Los resultados obtenidos confirman la veracidad de uno de los aspectos que esperábamos encontrar, y que más temíamos, como fue la falta de coincidencia entre los datos administrativos y los reales de los pozos. El resultado fue que la altura a la que se bombeaba no era la esperada y, en consecuencia, se tenían, o suministros excesivos (lo cual no es problema, porque como se ha justificado en otro apartado de esta tesis, resultaba ser una afortunada consecuencia), o suministros insuficientes. En este segundo caso, y para resolver la situación se sustituyeron las bombas por otras de tamaño adecuado, provenientes del material de repuesto previsto por el proyecto. Las organizaciones locales costearon las bombas necesarias para completar las piezas de repuesto como responsables

---

1. Aunque pueda parecer extraño por tratarse de una zona desértica, fue relativamente frecuente tener días nubosos que imposibilitaban cualquier tipo de ensayo. En el caso de Marruecos se explica por tener muchos de los sistemas muy cercanos a la cordillera del Atlas, que ejerce su influencia en el clima local.

Citamos como curiosidad, más por lo raro del caso que como intento de que sea demostrativo de nada, que en Adrar (situada prácticamente en el centro del desierto del Sahara, en Argelia), fuimos testigos de un periodo de lluvias de más de 12 horas. Según los habitantes de la ciudad, no se recordaban unas lluvias como aquellas desde hacía más de 20 años.

subsidiarias de la inexactitud en los datos concernientes a los pozos. En la tabla 3 se muestran las medidas realizadas.

Adicionalmente se revisaba la cabeza del pozo y el abrigo del mismo buscando, en primer lugar, protección para el agua frente a la contaminación por suciedad o caída de objetos extraños en el pozo, y en segundo lugar la correcta instalación de los elementos exigidos en las especificaciones: manómetro, contador de agua, sistema de potabilización, presostato, válvula antiretorno, llave de paso y grifo de servicio. Ejemplos de cabezas de pozo ejecutadas correctamente se muestran en las figuras 6 y 7.



*Figura 6: Cabeza de pozo de Tidzi (Marruecos). Se observan todos los elementos de la cabeza de pozo. Asimismo puede apreciarse el correcto cerramiento y protección del pozo.*



*Figura 7: Sondeo correctamente cerrado impidiendo la entrada de contaminantes y cuerpos extraños al agua.*

<i>País</i>	<i>Pueblo</i>	<i>Sistema tipo</i>	<i>HMT (m)</i>	<i>Suministro especificado (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Suministro medido (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Desviación (%)</i>
Túnez	Essahia	MEDA 2	22'8	1.750	1.809	3'3
	Mijna	MEDA 2	35	1.750	1.812	3'5
	Majhda	MEDA 1	35	850	1.093	28'6
Marruecos	Ait Zole	MEDA 1	22'6	850	856	0'7
	Zaouit sidi ahmed	MEDA 4	9'3	5.500	4.183	-24
	Iferd	MEDA 4	19'9	5.500	5.700	3'6
	Imin Site	MEDA 2	58'7	1.750	1.358	-22'4
	Issyl	MEDA 2	16'5	1.750	1.400	-20
	Sefkoumte	MEDA 3	65'5	2.600	3.030	16'5
	Bettal	MEDA 1	14'5	850	1.200	41'2
	Ait Arssan	MEDA 2	38'9	1.750	1.680	-4
	Tinlif	MEDA 1	15'6	850	1.600	88'2
	El Borj	MEDA 2	52	1.750	2.184	24'8
	Tagangoute	MEDA 1	42	850	924	8'7
Argelia	Messaad	MEDA 2	20	1.750	1.000	-42'9
	Ain Sidi Ali	MEDA 2	7'5	1.750	976	-44'2

Tabla 3: Resultados de los ensayos realizados sobre el terreno de la capacidad de suministro de los sistemas de bombeo.

Más adelante en este trabajo, cuando comentemos los aspectos relacionados con la integración de los sistemas de bombeo en su emplazamiento final, veremos la importancia de la posición de la válvula antiretorno con respecto al resto de los elementos de la cabeza de pozo.

#### 5.4.2.2. Generador fotovoltaico

Los ensayos en el laboratorio, verificaron previamente la eficiencia y el correcto funcionamiento del conjunto inversor-motobomba, pero para comprobar el suministro de agua del sistema completo fue necesaria la medida de los generadores fotovoltaicos en su emplazamiento final. Para ello, se utilizó una carga electrónica fabricada en el laboratorio, como ya se mencionó en el capítulo anterior y queda expuesto con todo detalle en el trabajo titulado “Capacitive load based on IGBT's for on-site characterization of PV arrays”<sup>77</sup>. En la figura 8 se muestran los resultados de las medidas.

Los resultados arrojados por las medidas mostraron que los generadores estaban dentro de lo declarado por el fabricante. Hay que tener en cuenta que el fabricante garantiza una potencia nominal de un módulo con una cierta tolerancia (en este caso del  $\pm 10\%$ ). Al

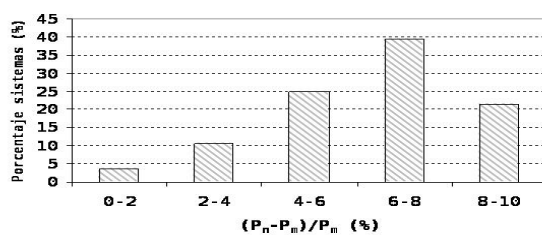


Figura 8: Resultado de la caracterización de los generadores fotovoltaicos de los sistemas instalados, donde  $P_n$  es la potencia nominal del generador, y  $P_N$  la potencia nominal.

construir un generador mediante la asociación de cierto número de módulos, hay que considerar dos fuentes de pérdidas de potencia que no están incluidas en esa garantía; las de desadaptación (o “mismatching”, en la terminología inglesa), y las ocasionadas por el cableado, que en algunos casos, como en el del pueblo de Tidzi en Marruecos, presentaban longitudes apreciables.

#### 5.4.2.3. Ejecución de la instalación

Este apartado pretende abarcar todo lo relacionado con la ejecución de la instalación de los equipos y demás elementos: cables, tuberías, cajas de conexión, etc, así como el acabado de abrigos para equipos (casetas, edificios, etc) y su limpieza.

La ejecución de la instalación de sistemas del programa fue bastante aceptable, pero como era de esperar, hubo bastantes casos en los que los trabajos de instalación eran francamente mejorables. El IES tuvo que intervenir en estos casos para que se hicieran las correcciones oportunas. En algunos casos las deficiencias eran de tipo estético, pero en muchos, además de estético, lo encontrado suponía un punto débil y una fuente de problemas para el sistema en el futuro. La deficiente conexión del circuito de tierra en un gran número de generadores fotovoltaicos, o la falta de protección contra la arena en algunas casetas de equipos y depósitos son dos claros ejemplos. En todos los casos, las correcciones indicadas fueron ejecutadas por los instaladores y comprobadas por el IES en sucesivas visitas.

En las figuras 9 y 10 ilustran un ejemplo de instalación de tierra mal ejecutada, y en la siguiente, la corregida. Básicamente consistió en construir una arqueta que la protegía pero que a la vez, permitía su inspección de forma cómoda. Además manteniendo la conexión entre cable y pica sin enterrar para evitar su oxidación prematura.

Para ilustrar este aspecto, mostramos un ejemplo más relacionado con el cableado. En dos imágenes en las que se aprecia claramente la diferencia entre una buena factura en el trabajo y una mala (figuras 11 y 12).



*Figura 9: Defectuosa instalación de la toma de tierra en el generador fotovoltaico.*



*Figura 10: Detalle de la toma de tierra de la instalación anterior protegida por una arqueta circular.*

La conclusión, es, sencillamente, que éste es un aspecto que no hay que dejar de cuidar, tanto a la hora de comenzar los trabajos, insistiendo en ello a los instaladores, como al final en la verificación de los sistemas. Aunque parezca que se están subrayando aspectos obvios, son precisamente éstos los que pueden determinar la calidad de la instalación.



*Figura 12: Cables mal distribuidos*



*Figura 11: Cableado correcto*

#### **5.4.2.4. Infraestructuras hidráulicas**

Hay referencias<sup>22,83,84</sup> de entre las que destacan el ya citado PRS<sup>85</sup>, que ponen de manifiesto que muchos de los problemas que padecen los sistemas de bombeo fotovoltaico actuales tienen su origen, precisamente, en la parte no fotovoltaica. Era una de las primeras aseveraciones de esta tesis, y éste es el momento en que se comprueba, lamentablemente, su validez. Incluso en este proyecto, en el que se estaba al acecho de esta eventualidad, los problemas en las infraestructuras hidráulicas aparecieron. A veces, referidos a las conducciones de agua, a veces a los cubrimientos de los abrigos de los depósitos y a veces al cerramiento de los pozos. Las visitas de aceptación provisional y aceptación definitiva sirvieron para detectarlos y solucionarlos adecuadamente.

En las figuras 13 y 14, aparece un punto de suministro de agua en donde se resolvió el trabajo de manera rápida y sin preocuparse de la comodidad en el aprovisionamiento o, lo más importante, de evitar fugas de agua. Como se aprecia en la figura 14, el agua goteaba de la tubería formando charcos importantes en el suelo. Las visitas de aceptación sirvieron para solucionar esta situación como se puede comprobar en la figura 15.



*Figura 13: Punto de aprovisionamiento de agua. Se puede apreciar la precariedad en la fijación de la tubería.*



*Figura 14: Derramamientos de agua en el punto mostrado en la figura anterior causados por las fugas y la falta de adecuación al aprovisionamiento de agua.*

Otro factor importante en el suministro de agua es el de su distribución hasta los puntos de aprovisionamiento (hogares, fuentes comunales como en el caso anterior, o piscinas para riego en otros). Fuimos testigos de operaciones de sustitución de tuberías de distribución que presentaban fugas por perforaciones causadas por las piedras existentes en el terreno por el que discurrían. Lechos de arena pueden solventar este riesgo, como se ve en las figuras 16 y 17.



*Figura 15: El punto de aprovisionamiento de la figura anterior corregido.*

En este otro ejemplo, mostramos un deficiente diseño del depósito (probablemente heredado del sistema original de aprovisionamiento de agua, antes incluso del sistema diesel) que obligaba a las expediciones que acudían a por agua, a llevar con ellas recipientes o una pequeña bomba de gasolina para re-bompear el agua del depósito a las



*Figura 16: Tubería en lecho de rocas*



*Figura 17: Tubería en lecho de arena*

cisternas, debido a la escasa altura del depósito. Las visitas de verificación realizadas fueron suficientes para convencer a los usuarios de que unas pequeñas modificaciones en las infraestructuras del punto de agua servía para facilitar la tarea de recargar agua y así evitar la necesidad de bombas adicionales como las mostradas, además de las pérdidas agua que estos métodos provocaban. En las figuras 18, 19 y 20 se ven ejemplos de aprovisionamiento de agua previos a la revisión realizada y los derramamientos de agua causados por las defectuosas tuberías utilizadas por los usuarios con sus pequeñas bombas.

Las modificaciones posteriores se ven en la figura 21. No solo se añadió una salida de agua elevada para el aprovisionamiento de cisternas, si no también un punto de aprovisionamiento apto para recipientes menores.





*Figura 18: Aprovechamiento de agua a base de recipientes fabricados de manera artesanal (en este caso con cámaras de rueda de camión)*



*Figura 19: Utilización de pequeñas bombas de gasolina en el mismo emplazamiento.*

Se podría poner un buen número de ejemplos de situaciones que fueron necesarias corregir para garantizar una buena calidad en los sistemas, como por ejemplo, cerramientos correctos en depósitos y casetas de pozo para evitar la contaminación del agua, o, colocación de arquetas en las distribuciones de agua cada 100 metros de tubería para poder aislar secciones en caso de averías, o adecuación de salidas de vaciado de depósito evitando grandes derrames de agua e incluso, en algunos casos, deterioro del terreno. La brevedad en la exposición aconseja no profundizar mucho en ellas, cuando la conclusión que se puede extraer ya ha sido expuesta claramente.



*Figura 20: Tuberías utilizadas para extraer el agua desde el depósito del sistema a los camiones cisterna mediante pequeñas bombas de gasolina. Se puede ver claramente la cantidad de agua derramada en la operación.*



*Figura 21: Al fondo, cerca de la caseta del pozo se puede ver la tubería instalada para el aprovisionamiento de los camiones cisterna. Y en primer término los grifos nuevos para recipientes más pequeños.*

#### **5.4.2.5. Potabilización**

En el capítulo 2 se dieron especificaciones solo aplicables a los sistemas de potabilización de agua constituidos, como elemento principal, por una bomba de eléctrica de inyección de cloro. Estos sistemas se sirven de una señal de control que es proporcional a la corriente de entrada a la bomba de suministro de agua. Como esta señal es proporcional al caudal que se está bombeando, se puede utilizar como referencia para inyectar la cantidad de cloro deseada. Aparte de esto, la bomba de inyección necesita una alimentación eléctrica, que puede venir del generador de la bomba principal o de otro independiente, junto con el concurso de una batería.

También se hizo mención a los denominados por la industria dosificadores proporcionales (estrictamente hablando, se podría utilizar también esta denominación para los descritos en el párrafo anterior) que se basan en el bombeo del agente potabilizador

utilizando la potencia aportada por el caudal principal de agua. Utilizan bombas de pistón y succionan el agente de un depósito que debe estar situado en un nivel inferior. En aquel capítulo no se propuso ninguna especificación concreta debido a la experiencia adquirida en este proyecto que los sitúa detrás de los eléctricos si atendemos a la durabilidad como criterio preferente.

Pues bien, en el proyecto que nos ocupa, se decidió utilizar los segundos por las siguientes razones:

- estudiar de primera mano su idoneidad en los sistemas de bombeo fotovoltaico,
- el hecho de no necesitar un sistema de alimentación constituía una característica lo suficientemente interesante como para poner bajo prueba esta tecnología en sistemas reales de bombeo descentralizado,
- el mercado tenía una amplia oferta de modelos cubriendo con éxito campos muy variados, entre los que se encuentra la potabilización de agua. Por lo tanto, aunque nunca se hubieran utilizado en sistemas de bombeo fotovoltaico, sí merecían su ensayo.

Pues bien, los sistemas de potabilización presentaron un solo problema, que fue el de su obstrucción debida a las partículas en suspensión en el agua bombeada. Estas partículas dañan las piezas principales de la bomba de pistón. De ahí la importancia de los filtros instalados a su entrada y, sobre todo, de la labor de limpieza de los mismos, absolutamente necesaria. Esta tarea es responsabilidad del encargado del sistema, y consiste, básicamente en limpiar y/o sustituir los filtros cuando sea necesario.

Hasta el momento en que se escriben estas líneas, la contabilización de averías e incidencias recibida, confirma lo declarado en el capítulo 2, (apartado 2.2.6) como se puede observar en la figura que se discutirá más adelante en el apartado 6.1. y que repetimos aquí por comodidad y para mostrar la relevancia de las incidencias presentadas por estos sistemas de potabilización.

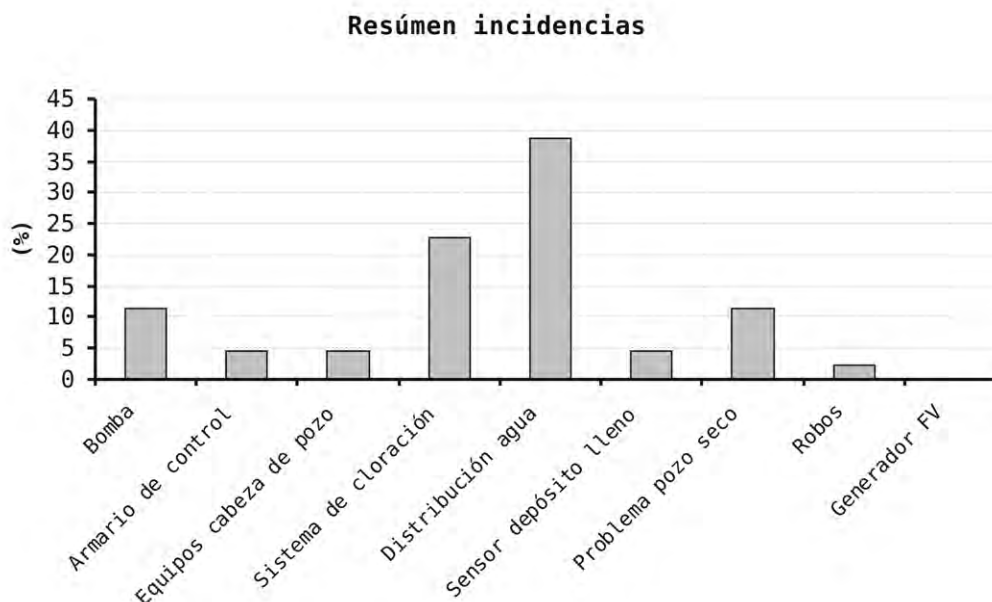


Figura 22: Recuento de incidencias. Los sistemas de cloración basados en bombas de pistón presentaron un índice de fallos considerable.

En lo tocante a la aceptación del agua tratada, la cantidad de cloro que están inyectando inicialmente es muy pequeña de manera que los usuarios, en principio no habituados, no se están manifestando en contra del suministro de agua, lo que podría desembocar en debates internos acerca de la utilización del clorador. Se ha constatado que el sabor del agua consumida está entre las prioridades más importantes de los usuarios a la hora de elegir la fuente del agua (apartado 5.2.1.2). Con el tiempo, la dosis de cloro a inyectar se irá aumentando hasta niveles aceptados internacionalmente<sup>87</sup>.

#### 5.4.2.6. Aspectos de integración

Uno de los aspectos más importantes de los ensayos in-situ es, como ya se ha apuntado anteriormente, la comprobación de que no surgen problemas o desajustes imprevistos cuando se ponen en funcionamiento todos los elementos del sistema de forma conjunta. Problemas de este tipo fueron observados en varios de los emplazamientos, surgidos debido a características que son difíciles de prever y/o reproducir en el laboratorio, como por ejemplo la orografía del terreno (que tiene influencia en la red de tuberías, tanto de llenado del depósito, como de distribución), o las características previas de las infraestructuras hidráulicas, como el caso de los rebosaderos. Como se dijo, heredado de la manera de operar las bombas alimentadas con sistemas diesel, el rebosadero estaba ubicado por debajo de la tubería de llenado, de forma que cuando el encargado observaba que el agua rebosaba, detenía el bombeo. Pero para un sistema FV que opera de forma aislada, y en el que es una boya la que cierra el paso del agua, esta configuración hacía que esto nunca sucediera, con el correspondiente derramamiento de agua. Una sencilla modificación para preservar la salida existente es la que se muestra en las figuras 23 y 24.



*Figura 23: Rebosadero modificado para hacer efectivo el método de detección de depósito lleno.*



*Figura 24: Igual modificación en otro pueblo para aprovechar el rebosadero antiguo que, normalmente está situado por debajo de la entrada de agua. A la izquierda se puede ver asomar la tubería que conecta con el rebosadero antiguo.*

La accesibilidad a la boya que cierra el paso de agua es una cuestión que tiene su importancia desde el punto de vista del mantenimiento. Es fácil imaginar que tarde o temprano habrá problemas y será necesario acceder a ella. Aunque pueda parecer obvio, hemos sido testigos de casos en los que era necesario vaciar el depósito para entrar y poder operar la boya. El vaciado precisaba, en algunos casos, de varios días (grandes depósitos de 500 m<sup>3</sup> de capacidad) con lo que es fácil imaginar que esta operación resulta ser delicada y supone trastornos importantes para el suministro de agua en la población.

Lo sucedido con el golpe de ariete en algunos de los sistemas fue otro ejemplo de característica imprevista y que se manifiesta solamente cuando el sistema está completamente instalado y en funcionamiento. De entre los sistemas más grandes, aquellos que tenían el depósito a mayor distancia presentaban el fenómeno del golpe de ariete. Ocurre cuando se produce una parada del bombeo en los momentos centrales del día, que son los correspondientes a una mayor velocidad del agua. Cuando esto sucede, el golpe de ariete provoca un pico de presión que puede alcanzar el nivel al que está tarado el presostato que avisa, erróneamente, de la situación de depósito lleno, (además de algún desperfecto como se aprecia en la figura 25). Éste abre el circuito provocando la parada del bombeo y que se dispare la temporización por depósito lleno. Dependiendo, entonces, de la cantidad de agua almacenada en ese momento, puede llegar a provocarse un desabastecimiento.



La solución más efectiva y sencilla fue la de intercalar válvulas antirretorno en los tramos de tuberías más largos restringiendo o acotando el efecto del golpe a secciones cortas de tubería, siendo de especial importancia la válvula instalada en la cabeza del pozo, y después del manómetro. Ésta conseguía dos objetivos, proteger los componentes de la salida del pozo y que el presostato no midiera estos transitorios elevados, y, en consecuencia, no parase el bombeo. El precio a pagar fue un aumento en las pérdidas de carga del circuito hidráulico. Sin embargo éstas eran perfectamente asumibles ya que estamos hablando de sistemas de largos recorridos y altos desniveles y, en términos relativos, estas pérdidas eran muy reducidas.

Por ejemplo, uno de los sistemas en los que se observaba este problema, tenía una diferencia de nivel entre depósito y pozo de unos 500 metros. A esto había que añadir las pérdidas de carga por metros de tubería, y demás elementos de la distribución de agua para obtener el valor de la HMT total. La longitud de tubería desde el pozo hasta el depósito, era de 1km aproximadamente, lo cual suponía un total de 10 válvulas antirretorno extra. De la literatura especializada<sup>69</sup> se puede obtener que las pérdidas introducidas por este elemento son del orden de 0'1 bares (1 metro) para los sistemas MEDA 4, suponiendo para ello el caso peor de caudal de agua generado. Teniendo en cuenta el desnivel entre depósito y pozo, 500 metros en este caso, esta pérdida de carga suponía menos del 2% sobre la HMT total, que era un mal menor comparado con el beneficio de protegerse frente al golpe de ariete. Adicionalmente, este problema suponía una fatiga para los materiales que también convenía evitar en aras de una mayor longevidad de los mismos.



Figura 25: Manómetro dañado por un pico de presión causado por un golpe de ariete.

## 5.5. Aspectos sociales y de gestión

Los aspectos sociales y de gestión comparten algo del concepto de ensayo utilizado en los apartados anteriores. Es oportuno comprobar la existencia y funcionamiento de una estructura que gestione los bombeos, e intentar estimar el grado de aceptación de la sociedad que lo utiliza de la misma forma que se verifica un cable o la factura de un depósito. Problemas en estos aspectos repercuten en el servicio prestado a medio plazo.

Para verificar estos dos aspectos hay varios indicadores inmediatos que hay que analizar y que ofrecen un panorama bastante preciso sobre la gestión y la aceptación social del sistema. Éstos son, por un lado, los datos de consumo, y por otro, la organización establecida para la operación del sistema.

### **5.5.1. Consumo de agua**

El análisis de los datos de consumo correspondientes al tiempo de operación hasta el momento de escribir esta tesis, confirma una vez más la tendencia a aumentar el consumo de agua cuando se facilita el acceso a ella. La forma de distribuir el agua es un factor determinante en el consumo en la medida en que influye en el esfuerzo invertido en el aprovisionamiento. En una buena parte de los pueblos, el proyecto mejoró la red de distribución, llevando el suministro de agua hasta las casas de los habitantes de cada comunidad. En casi todos los casos, la distribución consistía en una fuente en el patio de cada vivienda. En algún pueblo especialmente diseminado como Tarfchna, en Túnez, o Imnsite en Marruecos, en los que el agrupamiento humano se subdivide en algo que podría ser equivalente a barrios, se utilizaban fuentes comunales emplazadas en sitios estratégicos y que, como tantas otras veces se ha dicho, servían de centro de reunión de las gentes del pueblos. También, normalmente, estas fuentes existían previamente a la llegada del sistema fotovoltaico.

Sea como fuere, cada punto de consumo estaba equipado con su contador de agua, circunstancia ésta que no era habitual antes de la ejecución del proyecto, especialmente en los sistemas para irrigación y aprovisionamiento de ganado. Los puntos de consumo instalados en el proyecto son de 3 tipos:

- Punto de consumo particular.
- Punto de consumo comunal, normalmente para poblaciones muy distribuidas. De estos puntos se abastecen varias viviendas (caso de la figura 26).
- Punto de consumo de aprovisionamiento para ganado.
- Punto de consumo para irrigación.

En todos ellos existe ahora contador y sus datos son registrados regularmente por los encargados de los sistemas, que disponen de impresos en los que registrar las lecturas de los contadores, así como otras informaciones de interés, como averías, tarifa, reposición de cloro, etc. Para los casos de puntos de consumo no privados, es necesario la protección del contador para evitar el vandalismo y las inclemencias del tiempo. Normalmente se protegen con arquetas dotadas de una puerta con la que poder cerrar bajo llave el contador.



*Figura 26: Detalle de contador de agua en una fuente comunal para aprovisionamiento de agua.*

A continuación se muestran los datos de consumo en el proyecto. Gracias a la mayor experiencia de trabajo con la contraparte Marroquí, los datos de consumo se han recogido con mayor profusión y claridad en el caso de Marruecos que en el de Argelia y Túnez. Los proyectos previos en Marruecos, ya mencionados en varios puntos de este trabajo, establecieron un hábito y unos medios, que en este caso han sido de gran utilidad en la consecución de estos datos.

En la figura 27 se muestran los valores globales de consumo de agua por persona y día extraídos de los registros realizados por los cuidadores de las bombas fotovoltaicas. Recordamos en este punto que en la especificaciones CO1 y CO2, se proponían unos valores de consumo para el dimensionado de sistemas que estaban entre los 20 y los 45 litros por persona y día dependiendo de las facilidades en el aprovisionamiento de agua. El resultado obtenido en este proyecto viene a confirmar lo propuesto allí con bastante fidelidad y lo observado en estudios previos<sup>28</sup>, en los que los consumos se quedan en el entorno de los 20 litros por persona y día si se trata de comunidades aisladas. Como tales, se entiende aquellas que carecen de vías de comunicación que las enlacen con ciudades en las que acceder al “mundo urbano”. Cuando esto ocurre la población tiende a conservar hábitos de vida más tradicionales que llevan a reducir el consumo de agua. En este proyecto el resultado es coherente con las condiciones de aislamiento y dificultad de acceso impuestas inicialmente en el proyecto a los pueblos beneficiarios.



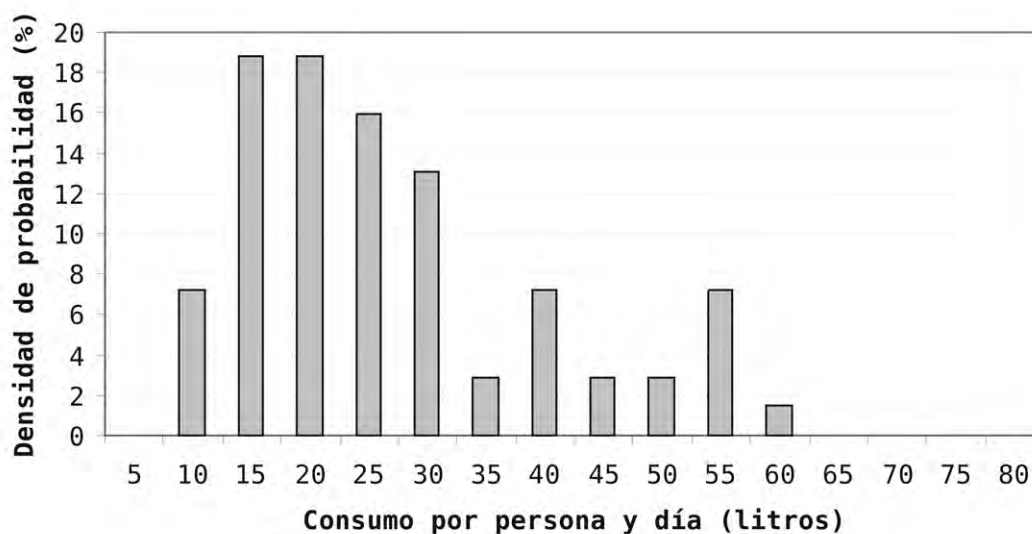


Figura 27: Distribución de los consumos de agua para el caso de Marruecos. Como se ve, los consumos más frecuentes están entre los 15 y los 30 litros por persona y día

### 5.5.2. Operación de los sistemas

Desde la fase más temprana del proyecto, el IES ha afrontado el problema de la gestión de los sistemas. Para ello, se introdujeron en las especificaciones unas líneas generales de obligado cumplimiento que se resumen a continuación:

- Contrato de mantenimiento firmado con un organismo local que siga una de las siguientes modalidades en el servicio a prestar:
- Garantía de servicio, consistente básicamente en realizar las intervenciones necesarias, durante la duración del contrato, para garantizar el suministro de agua asignado.
- Reparación de averías, consistente en visitas motivadas por averías (con un tiempo de respuesta de menos de 48 horas a partir de la notificación), más una visita anual rutinaria.
- Propuesta de otras modalidades de esquema de mantenimiento, aunque finalmente no hubo ninguna en este sentido.
- Suministro de un lote de piezas de repuesto por valor, como mínimo, del 5% del precio de los sistemas. Además, obligación de mantener disponibles piezas de repuesto durante un periodo de 5 años.

Con estos preceptos incluidos en las especificaciones, se sentaron las bases para que en cada región existiera al menos una estructura de mantenimiento básica. Estas normas, más o menos genéricas, obligaban al proponente a localizar, en el tejido económico local los actores más prominentes en el campo de los sistemas fotovoltaicos e hidráulicos. En el caso de Marruecos, la organización encargada de la gestión fue una ONG con amplia implantación y reconocimiento en la zona, y en Argelia y Túnez fueron organismos gubernamentales.

Obviamente, el obligado mantenimiento de bombas fotovoltaicas tiene un coste económico, que puede llegar a ser elevado si se presenta una avería que afecte a la bomba o al inversor. La necesidad de poder hacer frente a esta situación se arguye repetidamente como justificación para intentar convencer a los usuarios de que deben organizarse y cotizar regularmente por el agua que consumen, para así garantizar la perennidad del servicio.

Sin embargo, la realidad enseña que la existencia de usuarios dispuestos a pagar, no es suficiente. También hay que contar con un servicio técnico capaz de reparar averías en plazos cortos; y para que el coste de este servicio resulte razonable es preciso que atienda a un número de instalaciones suficientemente grande como para que su mantenimiento represente una fuente de ingresos estable. El tamaño mínimo del mercado capaz de sostener una estructura profesional de mantenimiento es una cuestión abierta y que no tiene una respuesta general.

Ahora bien, a nuestro entender, las organizaciones de usuarios y las prácticas sistemáticas de gestión pueden y deben jugar un papel más amplio que el de la mera recaudación de fondos para hacer frente al mantenimiento. En particular, pueden constituirse en una forma de aprendizaje, tanto para los usuarios como para los promotores de los proyectos, y también en una forma de comunicación entre estos actores.

En nuestra experiencia está, por ejemplo, que el hecho de registrar sistemáticamente datos de operación (consumos, incidencias, etc.) ayuda a los usuarios -tanto o más que cualquier cursillo de carácter puntual- a comprender en profundidad el funcionamiento de sus sistemas, reduce el sentimiento de “ajeneidad” frente a equipos que son relativamente sofisticados, y les llevan a plantearse cuestiones y alternativas que redundan positivamente en el cuidado que prestan a los equipos y, por ende, al beneficio que obtienen de ellos<sup>86</sup>. Por su parte, tales datos son de un valor inestimable para los promotores, en la medida en la que constituyen un registro de la historia evolutiva de los proyectos, indispensable para entender lo que de verdad ocurre en el lugar concreto considerado y poder enfrentar posibles incidencias en las mejores condiciones, y le permiten también acumular experiencias para mejorar su capacidad de predicción y diseño en futuros proyectos. Esto es particularmente importante porque, a pesar de la indudable madurez tecnológica de las actuales bombas fotovoltaicas, lo cierto es que son muchas las incertidumbres que aún subsisten respecto a su implantación el medio rural.

Por otro lado, la recogida y el tratamiento sistemático de los datos de operación obligan a mantener contactos rutinarios entre promotores y usuarios. Así, estos sienten que sus asuntos son motivo de interés para el mundo externo a sus poblados, lo que redundan positivamente en su autoestima, y llena de sentido a su tarea, siempre tediosa, de registrar periódicamente números cuya utilidad no podrían entender si simplemente se fueran acumulando en algún cajón del poblado. Además, cuando concurren varios poblados en un mismo proyecto, el contraste entre sus experiencias respectivas abre las puertas a la comunicación horizontal, es decir, entre los propios poblados, lo que contribuye a romper el sentimiento de aislamiento y marginación que afecta a muchas poblaciones rurales.

Por estas razones, hemos prestado particular atención a la preparación de los formularios de recogida de datos. Cada uno de ellos está asociado a un aspecto particular de la explotación del sistema. En concreto: datos generales del lugar (formulario A; periodicidad mensual), bombeo de agua (formulario B; periodicidad diaria), consumo de agua (formulario C; periodicidad mensual), gestión económica (formulario D, periodicidad mensual) y mantenimiento (formulario E; periodicidad mensual).

A modo de ejemplo, en las dos páginas siguientes, se presentan los formularios correspondientes al bombeo de agua y a la tarificación. En el primero se ha incluido espacio para una gráfica (que los propios usuarios van elaborando día a día) pensada para visualizar la evolución del ritmo de bombeo y alertar sobre cualquier posible anomalía (por ejemplo, fugas inadvertidas en la red de distribución) que lo altere de forma significativa.

Todos los formularios han sido impresos en papel autocopiativo, de tal forma que al rellenarlos se genera automáticamente una copia de cada uno de ellos. La organización local marroquí responsable de las relaciones con los usuarios – la ONG Tichka- recoge periódicamente las copias, procesa los datos mediante una aplicación informática muy sencilla, y hace llegar los resultados a los poblados, lo que fomenta el sentimiento de reciprocidad en su relación con los usuarios. Entre otras cosas, este esfuerzo ha conducido a la creación de un banco de datos de interés general, cuya explotación ha permitido avanzar significativamente en la comprensión de las pautas de consumo de los usuarios.

## **5.6. Lecciones aprendidas**

Tras las experiencias recogidas sobre el terreno, es hora de hacer balance y extraer de ellas lo que ofrecen de generalizable y, por tanto, de aplicación en otros entornos y proyectos. Para ello vamos a acudir a una metodología que habitualmente utiliza el IES para describir y analizar los sistemas energéticos<sup>79</sup>. Este método describe 3 aspectos: el "hardware", que incluye los equipos y materiales de que consta el sistema, el "software", o conjunto de procedimientos necesarios para utilizar los equipos, y el "orgware", estructura organizativa en la que se apoya el mantenimiento del servicio y a través de la cual el sistema interacciona con otros de diferente naturaleza.

### **5.6.1. "hardware"**

La aplicación de especificaciones técnicas que atienden a los problemas del bombeo fotovoltaico en entornos rurales y descentralizados, y el control de calidad del cumplimiento de dichas especificaciones mediante procedimientos de ensayo realizables localmente, se han mostrado muy efectivos si atendemos al registro de averías que se han dado en el programa durante los dos años siguientes a su finalización. La figura 30 recopila esta información.

Merece la pena aclarar un poco más extensamente qué se ha entendido con cada uno de los grupos de incidencias registrados:

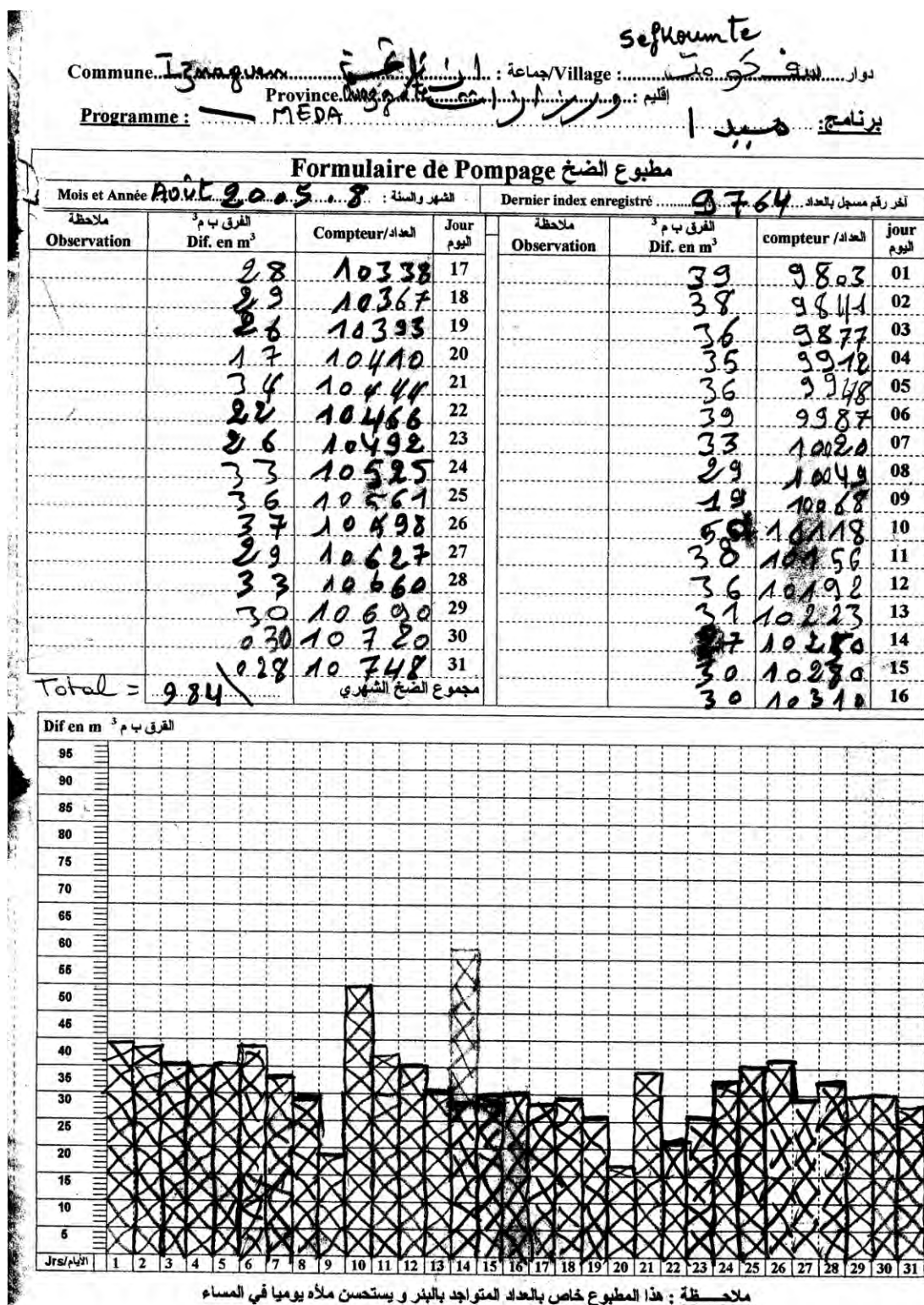


Figura 28: Ejemplo de hoja de anotaciones de los datos de bombeo procedente de uno de los sistemas en Marruecos.

158

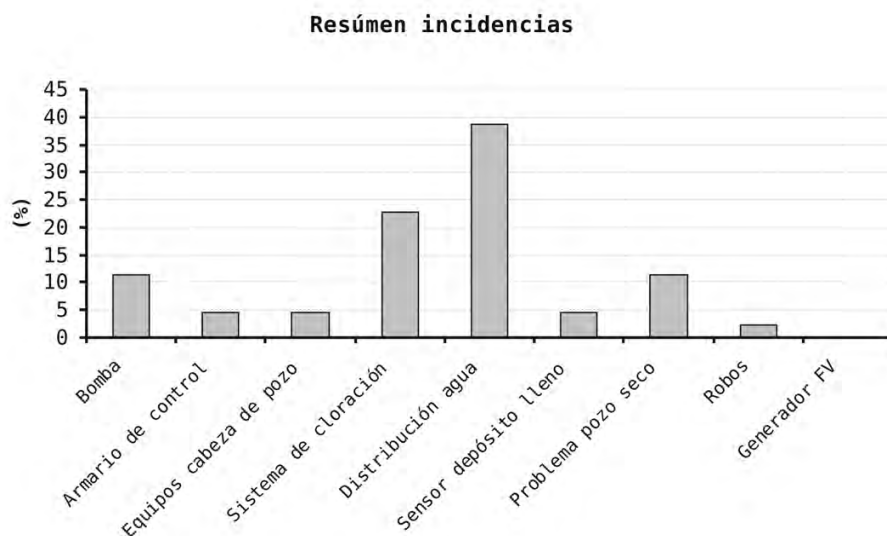


Figura 30: Resumen de incidencias registradas en las instalaciones de Marruecos.

- Bomba: problemas e incidencias con la bomba. Aquí están recogidas situaciones como la ruptura de ejes de la bomba, el deterioro causado por la materiales en suspensión en el agua, o los problemas causados por cortocircuitos en cables debido a rupturas de los mismos, teniendo todos ellos como resultado la parada de la bomba y la intervención del equipo técnico.
- Armario de control: Incluye todos los componentes alojados en dicho armario. A saber: convertidor DC/AC, varistores, autómatas, vigilantes de aislamiento, y ventiladores.
- Equipos cabeza de pozo: referidos a presostato, grifo de servicio, contador de agua, válvula antiretorno, y las bridas de conexión entre ellos.
- Distribución de agua: Todos los elementos que permiten la conducción del agua desde la salida de la bomba hasta la entrada al depósito, y desde la salida del depósito hasta los puntos de suministro de agua. Las incidencias aquí contabilizadas son, por ejemplo, fugas en tuberías o en las bridas de unión, problemas en válvulas de corte o de paso, y en las arquetas de distribución y problemas en puntos de aprovisionamiento. Destacan en número los problemas de fugas en tuberías y las intervenciones para modificar o reparar puntos de suministro de agua.
- Sistema de cloración: Comprende la bomba dosificadora de cloro y el filtro previo.
- Depósito: Fugas en depósitos, y problemas con los sensores de depósito lleno. La totalidad de las incidencias registradas (cerca del 5%) se han debido a problemas con los sensores de nivel allí donde se habían instalado dispositivos de esta naturaleza (en contraposición a los presostatos instalados en la cabeza del pozo para este menester).

- Problema de pozo seco: Este título abarca problemas de disminución del nivel de agua. De los problemas detectados, la mayoría ha precisado la reprofundización del pozo (con la consiguiente modificación de la profundidad a la que está instalada la bomba) o construcción de galerías laterales, y en una pequeña parte el alumbramiento de una nueva fuente de agua.
- Robos: referido solamente a los módulos fotovoltaicos. No hay noticia de robos de otros elementos de los sistemas.

Como dato adicional diremos que el 37% de los sistemas no ha registrado incidencia alguna.

De la información contenida en la figura 30 cabe resaltar, por un lado, que la revisión temprana de los sistemas hizo que numerosos problemas relacionados con la fase de instalación pudieran ser resueltos cuando dicha fase aun no había terminado y, por tanto, a un coste muy bajo. Por otro lado, se observa que la mayor parte de las averías están relacionadas con las infraestructuras hidráulicas y, por ello, el grueso de las lecciones aprendidas han tenido que ver con esta parte del sistema.

También hay que resaltar las incidencias surgidas con los dosificadores de cloro. Tal y como se apuntó en el apartado 3.2.6. (Potabilización) las tareas de mantenimiento a que obligan los sitúan tras los sistemas de inyección eléctrica en términos de fiabilidad. Además el rápido deterioro de las juntas de estanqueidad del cuerpo principal causado por la suciedad del agua (que en algunos emplazamientos era imposible de evitar a pesar de los filtros) fue la causa principal de las averías.

Simplemente, merece la pena subrayar que las soluciones adoptadas para proteger la bomba contra las eventualidades de depósito lleno y de pozo vacío, basadas respectivamente, en un conjunto flotador-presostato y detector de sobre-frecuencia en el convertidor DC/AC, se han mostrado especialmente fiables.

#### **5.6.1.1. La infraestructura hidráulica**

El grueso de los problemas técnicos observados en el terreno afecta a las infraestructuras hidráulicas que van desde la entrada del depósito hasta los grifos. Por ello les dedicamos un apartado exclusivo para poner de manifiesto los problemas detectados y la forma de solventarlos y/o aumentar el tiempo de su aparición.

Incluimos también las fuentes de agua por ser causa frecuente de problemas. En particular, cuando se trata de fuentes que acceden a acuíferos poco profundos, y que ya eran utilizadas con anterioridad al proyecto fotovoltaico. La capacidad de estos acuíferos suele ser muy sensible al régimen anual de lluvias, llegando a la pérdida total de agua en periodos de sequía prolongada. Además, las características de estas fuentes suelen estar adaptadas a los métodos de extracción preexistentes (mayoritariamente, manuales o bombas diesel de eje vertical), que casi siempre presentan caudales de bombeo inferiores a los que pueden extraer las bombas fotovoltaicas.

Conscientes de que este tema de las infraestructuras hidráulicas en medio rural ha

recibido muy poca atención en la literatura disponible, presentaremos aquí de una manera detallada lo que nosotros hemos aprendido sobre el terreno.

#### **5.6.1.1.1. Sobre el pozo**

La capacidad de un sistema de bombeo, en términos del volumen de agua que suministra diariamente, está ineludiblemente limitada por uno de los elementos siguientes: fuente, bomba, depósito o consumo. Obviamente, lo ideal es que el límite del suministro venga impuesto por el propio consumo de los usuarios, y que éste sea sensato. Sin embargo, en la realidad de los bombeos fotovoltaicos ocurre en numerosas ocasiones que el elemento limitante es el pozo.

La esencia del problema radica en que estos pozos, normalmente, acceden a acuíferos relativamente superficiales ( $< 50$  m) y poco potentes que, por eso mismo, varían mucho sus características según el régimen de lluvias, tendiendo a secarse en épocas de sequía, precisamente cuando la necesidad de agua es más perentoria. Estos pozos se perforan con técnicas artesanales (pico, pala y algún cartucho de dinamita), y su apertura no suele ir seguida de un ensayo de bombeo estandarizado, como es habitual en el caso de los sondeos. Hay que hacer notar que tal ensayo serviría de poco ya que, por un lado, las características de estos pozos fluctúan mucho a lo largo del tiempo y, por otro, porque estos pozos incorporan en sí mismos una cierta capacidad de acumulación que permite desacoplar el ritmo al que el agua se extrae del pozo del ritmo al que mana dentro de él.

La información disponible sobre la capacidad de estos pozos suele limitarse a la que puedan proporcionar los usuarios, traduciendo su propia experiencia en frases del estilo “este pozo nunca se seca”, “este pozo da mucho agua”, etc. Algunas veces, los pozos artesanales son objeto de intervención por parte de alguna autoridad local (municipios, ministerios relacionados con la hidráulica, etc.). Entonces, el consecuente proceso administrativo puede pasar por encargar el trabajo a una empresa especializada y por elaborar un expediente en el que figuran los tres valores de nivel estático,  $H_{ST}$ , nivel dinámico,  $H_{DT}$  y caudal de prueba,  $Q_T$ . Ahora bien, sea porque los expedientes se elaboren con poco rigor, sea por la evolución de las características de los acuíferos; lo cierto es que estos valores resultan típicamente poco representativos de la realidad. En consecuencia, el ingeniero fotovoltaico que debe instalar una bomba en un pozo artesanal se enfrenta, casi inevitablemente, a un nivel de incertidumbre muy elevado. La posible alternativa de restringir las bombas fotovoltaicas a los sondeos se ve dificultada en la práctica, porque la posibilidad de perforar sondeos está muchas veces fuera del alcance de las poblaciones rurales y, sobretodo, porque el agua de los sondeos tiene con frecuencia peor sabor que la de los pozos artesanales<sup>1</sup>. Así que cuando existen y la población confía en ellos, el ingeniero fotovoltaico no tiene más opción real que la de recurrir a estos pozos y tratar de abrirse paso a través de la incertidumbre. Paradójicamente, la propia confianza que la población pueda tener en sus pozos representa el principal escollo inicial. Como no puede ser de otra manera, esta confianza proviene de la experiencia anterior, y está normalmente

1.- El referido PRS-I optó precisamente por la alternativa de instalar bombas fotovoltaicas únicamente en pozos del tipo sondeo. Logró así evitar las situaciones de pozo seco, pero al precio de restringir mucho los poblados al alcance de su actuación (muchos poblados, simplemente no tienen sondeos) y de que en algunos lugares la población no bebe de su agua más que cuando no existen otras fuentes alternativas.



asociada a métodos extractivos de menor caudal que el que exigen las bombas fotovoltaicas.

Por ejemplo, para sacar agua de un pozo de 15 m de profundidad con un caldero de 5 l, una persona requiere en promedio de un minuto por caldero. Trabajando 6 personas al tiempo, que ya representan una concentración notable, el caudal que extraen del pozo no sobrepasa 30 l/min, o 1,8 m<sup>3</sup>/h. A modo de contraste, una bomba centrífuga alimentada por un generador fotovoltaico de 1 kW de potencia nominal, que resulta relativamente pequeño en el contexto del estado del arte actual, puede bombear más de 5 m<sup>3</sup>/h a 25 m de altura. Ubicada en aquel pozo de 15 m de profundidad y subiendo el agua hasta un depósito de 10 m de altura, una bomba así podría extraer hasta 25 m<sup>3</sup> de agua al día, suficientes para abastecer a una población de entre 500 y 1000 habitantes. El ingeniero responsable de la instalación de tal bomba bien podría recibir de los usuarios la información de que “este pozo en concreto da mucho agua y no se seca nunca” y, sin embargo, encontrarse diariamente con situaciones de pozo seco al instalar la bomba fotovoltaica. Y sólo entonces podría convencer a la población de la necesidad de afrontar el trabajo y el coste de mejorar su pozo, excavando más profundidad o galerías laterales.

Pues bien, esto que aquí se ha descrito para un caso hipotético, y un pozo del que anteriormente se extraía el agua manualmente, es muy similar a lo que realmente ha ocurrido en muchas de las poblaciones que este proyecto MEDA ha equipado con bombas fotovoltaicas, aun cuando anteriormente utilizaban bombas a diesel de eje vertical, cuya capacidad extractiva es mayor que la correspondiente a los métodos manuales. La razón es doble. Por un lado, las frecuentes averías que sufren estos equipos y las dificultades de acceso a los poblados (combustible, técnicos, etc.) se aúnan para hacer que el suministro de agua sufra interrupciones frecuentes y resulte caro<sup>1</sup>, y ambas cosas tienden a mantener el consumo en niveles bastante bajos. La bomba fotovoltaica aporta un escenario de consumo más regular, y algunas veces también más barato, en el que el consumo de agua tiende a crecer. Debido a esto, los volúmenes de agua bombeada se incrementan típicamente en más de un 30% durante los primeros meses de funcionamiento de la bomba fotovoltaica, con el consiguiente incremento de las exigencias manantiales planteadas al pozo. A esto colabora también el peculiar régimen de operación de las bombas fotovoltaicas que, por ajustarse a la evolución de la radiación solar, resulta limitado en tiempo (aproximadamente, 10 horas al día) y presenta un máximo en torno a las horas del mediodía. Comparando, para un mismo volumen diario de agua, una bomba fotovoltaica con otra cualquiera que funcione durante el mismo número de horas pero en régimen continuo, resulta que el caudal de la bomba fotovoltaica al mediodía es un 30% superior al caudal continuo de la otra. Combinando estas razones, se concluye que la sustitución de una bomba diesel por otra fotovoltaica se traduce en que el caudal máximo de bombeo puede incrementarse hasta en un 70% en los primeros meses de operación de la nueva bomba.

Como ya se mencionó en la sección 2.1.3 del capítulo 2, la capacidad de los pozos artesanos puede incrementarse aumentando su profundidad y/o excavando galerías laterales. Ambas técnicas incrementan tanto el área de percolación del agua desde el

---

1. El coste típico oscila entre 0'4 y 1 euro por m<sup>3</sup>

acuífero al pozo como el volumen de agua almacenada en él. Este almacén tiene la virtud de permitir que el agua mane en el pozo durante un período más largo del que la bomba tarda en extraerla de él, haciendo que el caudal continuo del pozo pueda ser significativamente inferior que el de extracción de la bomba. En último extremo, un pozo capaz de almacenar un volumen de agua igual al que una bomba fotovoltaica debe extraer cada día, podría estar manando agua las 24 horas mientras que la bomba la extraería en sólo 6. Es fácil ver que, entonces, el valor de  $Q_T$ , característico del pozo, podría ser unas 5 veces inferior al caudal de la bomba al mediodía. (Ver figura 2 de la sección 2.1.3 del capítulo 2).

A día de hoy, no disponemos de un procedimiento bien establecido para estimar lo que hay que excavar en un pozo artesanal para adaptarlo a las peculiaridades del bombeo fotovoltaico. Cuando nos hemos topado con el problema, hemos recurrido a observar cuánta agua es capaz de dar diariamente el pozo (mediante el contador de agua instalado rutinariamente a la salida de todas las bombas) y cómo varía su nivel dinámico a lo largo de aproximadamente una hora de bombeo. Después, nos hemos apoyado en el “saber hacer” sobre acuíferos superficiales y pozos artesanales, que existe en los medios rurales. En efecto, contando con esa información y sabiendo en cuánto hay que incrementar el volumen de agua extraído diariamente, los campesinos y poceros locales son normalmente capaces de encontrar una solución al problema del pozo, incluyendo la búsqueda de los medios financieros necesarios para la excavación. Naturalmente, esto requiere de usuarios convencidos y motivados y, es oportuno recordar que el mejor argumento a favor de este estado de ánimo lo constituye la experiencia directa con una bomba fotovoltaica que funciona correctamente durante un tiempo prolongado.

#### **5.6.1.1.2. Sobre los depósitos**

La función de los depósitos es principalmente la de desacoplar el ritmo al que se bombea el agua del ritmo al que se consume. De manera que los usuarios pueden seguir consumiendo agua en periodos de tiempo de baja insolación, o durante paradas temporales del bombeo (reparaciones, limpieza, etc). Para cumplir correctamente esta función el parámetro primordial es su capacidad de almacenamiento de agua, que, como norma general debe ser igual al doble del consumo diario previsto.

Los depósitos son los responsables de que el agua tenga la presión suficiente en los puntos de aprovisionamiento. Este parámetro depende de la altura a la que se encuentra el depósito y de las pérdidas de carga de la red de distribución. Como es fácil imaginar, el margen de valores que puede adoptar este último factor es amplio. A pesar de todo se puede dar como referencia una altura de entre 1 y 10 metros por encima de los grifos para repostar agua con comodidad.

Otras características a tener en cuenta son:

- Los depósitos también sirven de decantadores, proceso por el que el agua pierde la arena y otros materiales que pueda llevar en suspensión. Por ello es aconsejable que la entrada de agua esté lo más alejada posible de la de salida, dando así más oportunidad al proceso de decantación.

- Precisamente para evitar que los materiales decantados no pasen al circuito de distribución de agua, la salida de agua debe estar situada a unos 20 cm por encima del fondo del depósito.
- Las aberturas existentes, necesarias para labores de mantenimiento, deben estar convenientemente tapadas para evitar la caída de contaminantes al agua.
- Dado que el vaciado del depósito es una operación de mantenimiento que es preciso realizar con cierta frecuencia, es necesario prever canales de evacuación para el agua derramada en estos casos. Irrigación de palmerales, utilización en la fabricación de ladrillos de adobe, o el vertido de nuevo al pozo, si éste está cerca, pueden ser soluciones adecuadas.

#### **5.6.1.1.3. Sobre las tuberías y otros accesorios**

Las tuberías y resto de accesorios que componen la red de distribución (grifos, contadores, llaves de paso, etc.) constituyen el elemento que con mayor frecuencia se deja totalmente al cuidado de las capacidades técnicas de los usuarios y fontaneros locales. Esta práctica que puede interpretarse como una forma de permitir la participación efectiva de los usuarios y mejorar su capacidad para reparar futuras averías, debe ser fomentada activamente en los proyectos.

Ahora bien, no hay que olvidar que todas las evaluaciones que conocemos señalan la existencia de numerosas deficiencias en las redes de distribución, y que estas deficiencias afectan negativamente a la calidad del servicio. A nuestro entender, la principal razón de esta situación lamentable hay que buscarla en lo que algunos han definido como el “atrevimiento del conocimiento superficial”. Este fenómeno psicológico consiste en autoconvencerse de que uno mismo sabe lo suficiente sobre un tema del que carece totalmente de experiencia y de conocimientos profundos. Entre otras cosas, este fenómeno lleva a quien lo sufre a pensar que ese algo es en realidad bastante fácil y que, en consecuencia, él mismo y sin mayor preparación previa puede hacerse efectivamente cargo de su ejecución y cuidado. Esta especie de amnesia sobre lo que se ignora está muy extendida en general, y afecta a casi todos los actores que participan en los proyectos de bombeo. Los ingenieros no son la excepción, y a ello contribuye el bajísimo peso que las humildes tuberías reciben en los numerosos cursillos de formación que se imparten sobre electrificación rural, que tienden a ocuparse de asuntos de apariencia más sofisticada como, por ejemplo, la física del funcionamiento interno de las células solares, la estimación de los diferentes componentes de la radiación solar, o el dimensionado de generadores fotovoltaicos. Esta tendencia, comprensible por lo que tiene de ejercitar las habilidades duramente adquiridas durante los años de estudio en la universidad, debe ser combatida porque resulta perjudicial a la hora de ejecutar proyectos en el terreno.

El tema viene de lejos. A comienzos del siglo XVI, el humanista español Juan Luis Vives, preocupado por el desprecio que las clases intelectuales mostraban por los asuntos técnicos más populares, invita al “hombre culto” a que “no tenga empacho de acudir a las ventas y a los obradores, y preguntar y aprender de los artesanos las peculiaridades de su profesión; porque de muy atrás los sabios desdeñaron apearse en este plano y se quedaron

sin saber una porción incalculable de cosas que tanta importancia tienen para la vida...”<sup>1</sup>. Esperemos que esta cita colabore a que los ingenieros actuales presten más atención a lo que entienden como cosas humildes de los artesanos. De ello podrán obtener beneficios para sí mismos y para el buen fin de sus proyectos.

Fallos relevantes que se cometen con frecuencia en las redes de distribución son: enterrar las tuberías de tal forma que resulten proclives a las fugas de agua, no disponer elementos suficientes como para poder aislar secciones de la red en caso de reparación (cuando no existe más que una llave de paso a la salida del depósito, la reparación de cualquier avería obliga a cortar el suministro de agua a la totalidad de la población), y no proteger estos elementos mediante arquetas de cemento, o similar, que permitan acceder a ellas con facilidad y utilizarlas con seguridad. Para el ingeniero verdaderamente interesado es muy fácil encontrar información sobre cómo diseñar y ejecutar correctamente redes de distribución de agua. Las recomendaciones que nosotros hacemos aquí son las siguientes:

- Enterrar las tuberías sobre un lecho de arena que esté libre de piedras afiladas que puedan provocar fugas en las mismas (especialmente en el caso de las más débiles de polipropileno expandido).
- Disponer de arquetas con uniones y llaves de paso con objeto de aislar secciones de la red de distribución de manera que se puedan llevar a cabo fácilmente las labores de mantenimiento.

### **5.6.2. "Software"**

Los usos, costumbres y prioridades de los usuarios, forjadas a lo largo de siglos, condicionan el modo de utilización de los sistemas de bombeo fotovoltaico, tanto en la cantidad de agua consumida como en la calidad de la misma. Es por eso que vamos a profundizar aquí en las lecciones aprendidas a este respecto.

#### **5.6.2.1. Las prioridades de los usuarios**

Estudios más detallados de estos sistemas, en los que se analizan las peculiaridades de sus tres componentes (“hardware”, “software” y “orgware”) y las consecuencias que se derivan de ello a la hora de implantar proyectos de bombeo fotovoltaico en estas zonas, pueden encontrarse en varias referencias<sup>23, 79</sup>, directamente accesibles por Internet. Aquí nos limitaremos a enfatizar que las prioridades que, a nuestro entender, perciben los usuarios rurales se ajustan al orden siguiente: fiabilidad del suministro, sabor del agua, esfuerzo empeñado en su manejo y, por último, calidad sanitaria del agua. El establecimiento de este orden de prioridades no deriva de preguntas directas a los usuarios, método este que puede resultar muy equívoco, sino de la observación de algunos detalles particularmente relevantes.

Un principio básico de la teoría de sistemas enseña que la aceptación de una innovación tecnológica depende esencialmente del “grado de novedad” contenido en dicha innovación, entendido como la medida de las diferencias entre el sistema inicial (el

---

1. Este texto pertenece al libro “De tradendis disciplinis”, publicado en 1531, y puede traducirse por “Sobre la forma de transmitir conocimientos”

tradicional) y el sistema final (el de la bomba fotovoltaica). Cuanto mayor es el grado de novedad, mayor es el riesgo de fracaso. La conclusión es que para que un proyecto tenga éxito hay que intentar minimizar esas diferencias.

De esta idea se pueden derivar reglas concretas de actuación en la práctica. Respetar las prioridades de los usuarios es la más importante. Y esto quiere decir que el diseño (de la bomba fotovoltaica y del resto de los equipamientos: pozos, depósitos, tuberías, etc.) debe atender prioritariamente a la fiabilidad; que la bomba, si está destinada al consumo humano, debe instalarse precisamente en el pozo que proporciona el agua de mejor sabor; y que si se pretende que las personas utilicen preferentemente el agua de la bomba fotovoltaica hay que disminuir en lo posible el trayecto entre los puntos de abastecimiento y las viviendas.

De hecho, el respeto a estas prioridades es tan importante que cualquier intento de avanzar en los aspectos formativos y organizativos, que conlleva todo proyecto, está condenado al fracaso si previamente los usuarios no están convencidos de que el agua sale siempre por los grifos y de que sabe bien. Así, el proceso de implantación de un proyecto puede ser bastante rápido si en las vecindades de un lugar ya existe alguna otra bomba fotovoltaica que funciona bien (las consecuentes noticias habrán convencido a los usuarios de la bondad de esta tecnología); pero deberá ser bastante más lento allá donde no exista experiencia fotovoltaica previa (habrá que mantener la bomba en perfecto funcionamiento durante algunos meses, para que los usuarios vean por si mismos<sup>1</sup> que se trata de un equipamiento fiable, antes de embarcarse en actividades efectivas de formación y organización); y mucho más lento aún allá donde anteriormente haya habido una mala experiencia fotovoltaica (entonces, la espera deberá prolongarse hasta que los usuarios se convenzan de que a su bomba no le ocurrirá lo que saben, o suponen, que ocurrió con la anterior).

Hay muchas otras reglas de actuación que pueden derivarse de la idea de intentar minimizar el grado de novedad. Ejemplos de ello son:

- Las personas o grupos sociales relacionados con los asuntos del agua, deben ser reconvertidos para que mantengan una posición efectiva equivalente en la organización asociada a la nueva bomba. En particular, el papel prioritario que en el abastecimiento tradicional de agua a las viviendas juegan las mujeres hace que estas deban sentirse partícipes importantes en la organización del nuevo sistema.
- Allá donde el abastecimiento de agua se asocie a costumbres sociales bien enraizadas (por ejemplo, donde el acudir al pozo sirva como ocasión para reuniones cotidianas) conviene optar por distribuir el agua mediante fuentes públicas ubicadas en los mismos lugares donde se manifiestan tales costumbres.
- Allá donde la vida transcurre mayoritariamente en el interior de las viviendas, conviene pensar en sistemas de distribución que lleven el agua al interior de las casas.

De nuevo, el lector interesado en profundizar en estos temas puede acudir, por ejemplo,

---

1. Maquiavelo hablando sobre la timidez con la que los beneficiarios de una novedad definen a su promotor dice: "esta timidez nace en parte de la incredulidad de los hombres quienes – en realidad- nunca creen en lo nuevo hasta que adquieren una experiencia firme de ello". ("El príncipe", VI).

a esta referencia<sup>81</sup>.

#### 5.6.2.1.1. *Fiabilidad*

Por ejemplo, en el Sáhara se puede constatar que cuando el pozo está situado en las afueras del pueblo, es decir, a una cierta distancia de las viviendas, cada familia que acude a por agua lo hace con su propia cuerda y caldero para izar el agua desde el pozo. Este procedimiento representa un claro atentado contra la calidad sanitaria del agua, en la medida en la que el propio manejo de estos elementos (que se guardan de un día para otro en las cuadras de los animales, etc.) acarrea suciedad al agua. Sin embargo, tiene la ventaja de que garantiza la seguridad de disponer de ellos siempre que se acude al pozo, en contraste con lo que ocurriría con un equipamiento comunitario, cuyo mantenimiento en condiciones de buen uso es siempre más difícil de asegurar, que haría bastante probable el escenario de caminar hasta el pozo y encontrarse sin medios para sacar agua. Por tanto, puede interpretarse como una manifestación de la prioridad que los usuarios conceden a la fiabilidad, en este caso, en detrimento de la calidad sanitaria del agua. Por razones similares se observa una marcada preferencia por los suministros de agua desde pozos situados en tierras del común y no de un único propietario, quien siempre podría verse tentado a impedir el acceso al agua y a crear situaciones conflictivas.

#### 5.6.2.1.2. *Sabor*

El sabor del agua está relacionado esencialmente con la concentración de sales disueltas en ella. A mayor salinidad peor sabor. La salinidad se expresa en gramos de sal por litro de agua, g/l. La medida de la conductividad, o conductancia específica, del agua es un medio para apreciar su salinidad. A mayor salinidad mayor conductividad. La conductividad se expresa en microsiemens por centímetro,  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , (el *siemens* es la unidad de medida de conductancia en el Sistema Internacional. Equivale al recíproco del ohmio).y existen equipos que la miden directamente. La tabla 4 presenta una interpretación aproximada de la relación entre la conductividad, la salinidad y la calidad, en términos de sabor, del agua.

<b><i>Conductividad (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</i></b>	<b><i>Salinidad (g/l)</i></b>	<b><i>Calidad</i></b>
de 0 a 400	de 0 a 0'25	buena
de 400 a 750	de 0'25 a 0'5	media
de 750 a 1.500	de 0'5 a 1	mediocre
Más de 1.500	más de 1	mala

Tabla 4: Relación entre la salinidad, la conductividad y el sabor del agua.

La disolución de sales en el agua depende esencialmente de la composición de la roca que acoge al acuífero y del tiempo que permanece el agua en contacto con la roca. En determinadas circunstancias, la propia extracción de agua tiende a salinizar los acuíferos, por lo que no es raro encontrarse con pozos que han sido abandonados por esta razón.

La importancia que las gentes conceden al sabor del agua se pone de manifiesto por el hecho de que en casi todos los lugares que conocemos la fuente de agua destinada al

consumo humano es única y está elegida atendiendo casi exclusivamente a este particular y con independencia de su distancia a las viviendas que, algunas veces, llega a ser de varios kilómetros.

#### **5.6.2.1.3. Esfuerzo**

Una vez garantizada el agua en cantidad, y cuando es para consumo humano también en sabor, las poblaciones buscan minimizar el esfuerzo que deben empeñar en su extracción y transporte. Tal esfuerzo suele ser muy grande de por sí, y lo es todavía más cuando se analiza en el contexto de escasa disponibilidad energética que asola a las poblaciones rurales.

Así, el simple abastecimiento doméstico de una familia de 10 personas, desde un pozo con 20 m de profundidad situado a 1 km de distancia de la vivienda, equivale al trabajo de una mujer durante unas 6 horas. A modo de contraste, un sistema de bombeo fotovoltaico alimentado por un generador de 1 kW de potencia nominal y que elevase el agua hasta un depósito situado a 10 m sobre el suelo (para favorecer el transporte del agua hasta el punto de consumo) podría realizar la misma tarea en sólo 2 minutos, y podría trabajar diariamente lo equivalente a ese ritmo durante unas 5 horas. Entonces, tal bomba realizaría un trabajo de sólo 1.200 Wh (equivalente al consumo eléctrico diario de un frigorífico convencional). ¡Pero podría sustituir el trabajo de unas 300 mujeres!

Naturalmente, el abanico de situaciones que puede encontrarse en la realidad es muy amplio (diversas distancias y alturas, diversos medios de transporte: burros, carretillas, etc.), de tal forma que no le será difícil al lector imaginar y analizar muchos otros supuestos tan representativos como el desarrollado aquí. La conclusión última será siempre que el aporte de energía externa a los medios rurales, aun cuando las cantidades puedan parecer pequeñas en términos absolutos, reporta beneficios muy importantes en términos de aliviar la situación de las personas. El correspondiente excedente de tiempo, con respecto a la situación anterior, puede emplearse en otras cosas que redundan en la mejora de las condiciones de vida: ocio, higiene, educación, negocio, etc.

En ese alivio y en sus consecuencias reside, en último extremo, el potencial de ayuda al desarrollo que encierran las bombas fotovoltaicas. Además, representan una posibilidad real de mejora de la calidad sanitaria del agua que beben las personas, si la infraestructura que conllevan (tubos, depósitos, grifos, etc.) se diseña con la debida atención.

#### **5.6.2.1.4. La calidad sanitaria del agua**

Por raro que pueda resultar a los ojos de quienes vivimos en las ciudades y estamos habituados a comprar agua embotellada, para garantizar su higiene; esta cualidad ocupa un lugar muy poco relevante en las preocupaciones de las poblaciones rurales. Lo trataremos en profundidad un poco más adelante.

#### **5.6.2.2. El consumo de agua**

La siguiente tabla resume las observaciones en el terreno en lo que a consumo de agua se refiere antes de instalar los sistemas fotovoltaicos.

<i>Sistema</i>	<i>Litros por persona y día</i>	
	<i>Medios manuales</i>	<i>Medios mecánicos</i>
Consumo humano	de 5 a 10	de 15 a 20
Otros usos	muy variable	de 10 a 25

Tabla 5: Consumos de agua para uso doméstico observados en el terreno<sup>28</sup>

El incremento del consumo aparejado a la utilización de medios mecánicos (bombas a diesel, eléctricas, etc.) es consecuencia de la disminución del esfuerzo que representa para las personas. Obviamente, a menor esfuerzo mayor consumo.

Para estimar el consumo futuro de agua, es bueno considerar la forma que vaya a adoptar la red de distribución, y la posible existencia de otras fuentes de agua. En el supuesto de que el pozo elegido para instalar la bomba fotovoltaica proporcione agua suficiente y de buena calidad, una red de distribución que permita llevar el agua hasta el interior de las viviendas hace que el agua que sale por los grifos sea a la vez la de mejor sabor (utilizada, por tanto, para el consumo humano) y la que se obtiene con menor esfuerzo (y, por tanto, la utilizada para otros usos). Habrá entonces que pensar en bombear hasta 45 litros de agua por persona y día. Sin embargo, en los lugares donde la red de distribución vaya a limitarse a llevar el agua hasta unas cuantas fuentes públicas y existan, además, otras fuentes de agua fácilmente accesibles, llegará con suministrar diariamente 20 litros por persona.

Hay que señalar que los datos disponibles en la literatura sobre consumos de agua observados en medios rurales son más bien escasos, y los que hay exhiben una gran variabilidad, que refleja el amplio abanico de situaciones que pueden darse en la práctica, incluso dentro de una misma región. En este contexto, ciertamente difuso, las cifras de entre 20 y 45 litros por persona y día, sugeridas aquí como base para encarar el diseño de bombas fotovoltaicas, suelen conducir a situaciones francamente cómodas durante los primeros años de funcionamiento de los proyectos. No obstante, hay que considerar que la gran dinámica de las poblaciones rurales (afectadas por fenómenos como natalidad elevada, retorno de emigrantes durante los periodos de vacaciones, incrementos puntuales durante las épocas de cosecha, etc.) obliga a considerar el escenario de tener que suministrar agua para más personas de las que constituían la población estable en el momento de implantar el proyecto<sup>1</sup>. Por otro lado, también hay que considerar que, como ya hemos mencionado, el coste de sobredimensionar las bombas es relativamente pequeño, puesto que afecta sólo al tamaño del generador fotovoltaico y que este no representa más del 17% del coste total de los proyectos.

### 5.6.2.3. La calidad sanitaria del agua

La figura 31 presenta a unas mujeres cargando agua en un manantial y que sitúan a los burros dentro del agua, como medio para facilitar la carga, aunque el procedimiento vaya en detrimento de la calidad higiénica del agua. Este hecho, chocante a primera vista, se

1. En Iferd un pueblo del sur Marroquí, se instaló una bomba fotovoltaica en febrero de 1997. El número de viviendas ha ido creciendo desde las 55 de entonces, hasta las 80 actuales. La primitiva bomba, de 3,3 kW, ha tenido que ser cambiada por otra de 8.5 kW.





*Figura 31: Mujeres aprovisionándose de agua en un río introduciendo los burros en su lecho para facilitarse la tarea (Marruecos).*

entiende cuando se considera la magnitud del esfuerzo que requiere el abastecimiento de agua por métodos manuales, tal y como vimos en el apartado anterior.

La figura 32 muestra bidones de plástico reciclados para transportar agua a las viviendas. La fotografía fue obtenida en el Centro Oeste de Brasil<sup>23</sup>, y no tendría nada de particular sino fuera porque los bidones proceden del transporte de ¡pesticidas!. Las buenas propiedades mecánicas de estos bidones (exigidas por el manejo de sustancias tóxicas) facilitan el esfuerzo invertido en el transporte de agua, y compensan el riesgo de envenenamiento. ¡El tratamiento de reciclaje que realizan los usuarios se limita a lavarlos con agua y jabón hasta que desaparece el olor del pesticida!.



*Figura 32: Bidones de pesticida utilizados para aprovisionarse de agua*

Al escaso cuidado que prestan las personas a la higiene del agua, se suma el hecho de que, para llegar a la mesa, el agua transcurre por una infraestructura abierta en numerosos puntos que, en consecuencia, permite que la suciedad entre con mucha facilidad.

Desde una perspectiva urbana, parece raro que las personas de los medios rurales se muestren conformes con situaciones como las descritas aquí. Sin embargo, hay que recordar que lo que hoy son ciudades modernas, fueron tradicionalmente lugares muy insalubres hasta que, a finales del XIX, se difundió el uso de máquinas de vapor alimentadas por carbón, que permitieron suministrar agua en cantidad y calidad, y se instalaron redes de distribución y recogida, que extendieron el servicio a la mayoría de las viviendas. Lo cierto es que cuando se vive en condiciones insalubres y la energía disponible es escasa, la preocupación por la higiene del agua no tiene demasiado sentido. Los humanos tendemos a la natalidad elevada y, en esas condiciones, es más rentable energéticamente reponer las pérdidas que causa la insalubridad que luchar directamente contra ella. No es casualidad que las tasas de natalidad más elevadas se den, precisamente, entre las poblaciones más pobres.

Ahora bien, comprender esta situación no tiene por qué llevar necesariamente a conformarse con ella. El ingeniero fotovoltaico, cuando diseña una bomba destinada al abastecimiento humano, dispone de una excelente ocasión para alterar esta situación y luchar directamente contra la insalubridad. La ocasión la proporciona la posibilidad de realizar infraestructuras (fuente incluida) cerradas, que no permitan el ingreso de suciedad al agua. Adicionalmente, puede incluir en el sistema facilidades para la cloración. Por lo visto en el apartado 5.2.1, no es de esperar que los usuarios compartan al principio su preocupación por la calidad sanitaria. Sin embargo, a condición de respetar las otras

prioridades de los usuarios (en particular, la fiabilidad del suministro), es perfectamente posible rentabilizar el clima de confianza y credibilidad, abonado por el buen funcionamiento de las bombas, para intentar educar a los usuarios (que ahora disponen del excedente de tiempo liberado por la bomba fotovoltaica) en el sentido de incorporar la calidad sanitaria del agua a sus preocupaciones cotidianas.

El apartado siguiente presenta un material didáctico pensado para servirle de ayuda en esta tarea. Desarrollado en el marco de este proyecto MEDA, ha disfrutado de excelente acogida entre los usuarios, cuando lo utilizamos en seminarios destinados a mejorar su educación y capacidad de gestión. Hay que decir que tales seminarios se realizaron cuando todas las bombas estaban en perfecto funcionamiento desde hacía varios meses, por lo que los usuarios estaban entusiastas con la nueva tecnología, y la confianza presidía su relación con los promotores del proyecto.

### **5.6.3. “Orgware”**

Las lecciones aprendidas en torno a la organización de los usuarios y la gestión del servicio son las siguientes.

#### **5.6.3.1. Organización de usuarios y gestión de agua**

Un proyecto de bombeo fotovoltaico exige de un interlocutor que represente a los usuarios frente a los promotores, y de alguna persona que se responsabilice de la gestión diaria de los sistemas (limpieza, registro de datos, cobros, etc.). Tanto para lo uno como para lo otro, es preciso que los usuarios adopten alguna forma de organización, que los promotores deben reconocer y favorecer.

En general, las organizaciones de usuarios mejoran la cohesión interna de las poblaciones rurales, lo que tiene muchas veces efectos colaterales positivos, al margen de lo estrictamente relacionado con la propia bomba fotovoltaica. Pero no es menos cierto que tienen el riesgo de reflejar posibles conflictos sociales preexistentes, y que ello puede llegar a afectar negativamente a la gestión de las bombas fotovoltaicas. Conocemos casos en los que los “comités del agua”, aprovechando las habilidades adquiridas en la gestión del agua, han servido para solicitar y promover otros servicios; pero también conocemos otros en los que, lejos de asumir la representación del conjunto de una población, han sido controlados por uno de los bandos en conflicto, provocando que otros hayan optado por conductas impropias: impagos, etc. Para minimizar este riesgo es, de nuevo, útil la idea de intentar minimizar el grado de novedad que incorporan los proyectos, apoyándose en lo posible en organizaciones locales ya existentes, y respetando el orden social anterior al proyecto<sup>1</sup>.

El mantenimiento de la bomba fotovoltaica, que puede tener un coste elevado si se presenta una avería que afecte a la bomba o al inversor, es otra razón para la existencia de este tipo de organizaciones.

---

1. A veces, este respeto es difícil de mantener, porque el orden social preexistente puede repugnar a las propias convicciones éticas de los promotores. Como todo aquello que afecta a cuestiones éticas, lo que se pueda decir al respecto siempre resulta discutible. Nuestra conclusión es que, quien decida utilizar un proyecto de cooperación como instrumento para cambiar el orden social de las poblaciones afectadas, debe estar advertido de que su apuesta conlleva un alto riesgo de rechazo.

Sin embargo, la realidad enseña que la existencia de usuarios dispuestos a pagar no es suficiente. También hay que contar con un servicio técnico capaz de reparar averías en plazos cortos; y para que el coste de este servicio resulte razonable es preciso que atienda a un número de instalaciones suficientemente grande como para que su mantenimiento represente una fuente de ingresos estable. El tamaño mínimo del mercado capaz de sostener una estructura profesional de mantenimiento es una cuestión abierta y que no tiene una respuesta general<sup>1</sup>. Pero, casi con independencia de cuál sea el caso, la creación de las condiciones para que tal mercado llegue a materializarse cae fuera del alcance de los proyectos típicos de Ayuda al Desarrollo, entra más bien en la esfera de lo institucional y de lo “macro” y, en consecuencia, su tratamiento no cabe en este texto, más allá de decir que, afortunadamente, la tecnología fotovoltaica está en expansión, lo que hace que cada vez sean más los lugares donde se pueden encontrar empresas fotovoltaicas que ofertan equipos y servicios a costes razonables. Obviamente, allá donde ese sea el caso, los proyectos concretos deben apoyarse en ellas todo lo posible.

Ahora bien, a nuestro entender, las organizaciones de usuarios y las prácticas sistemáticas de gestión pueden y deben jugar un papel más amplio que el de la mera recaudación de fondos para hacer frente al mantenimiento. En particular, pueden constituirse en una forma de aprendizaje, tanto para los usuarios como para los promotores de los proyectos, y también en una forma de comunicación entre estos actores.

Por ello, hemos prestado particular atención a la preparación de los formularios de recogida de datos a los que se ha hecho referencia en el apartado 4.2<sup>2</sup>.

La puesta en práctica de estas claves en el programa MEDA no sólo ha proporcionado los réditos a los que aquí hemos hecho referencia, sino que bajando a lo puramente crematístico, está proporcionando los ingresos necesarios, a través del cobro por el consumo del agua, para realizar el mantenimiento de los sistemas, tal como se muestra en la figura 33

---

1. Para una idea aproximada del alcance de ese mercado mínimo, se puede suponer, por ejemplo, que tal estructura precisa de reparar tres bombeos por mes para sostenerse. Entonces, su supervivencia exige de un parque de 225 bombeos dentro de su radio de acción. Obviamente, si la empresa realiza otras actividades (instalaciones eléctricas, etc.) las exigencias del parque fotovoltaico disminuyen.

2. El conjunto de los formularios es accesible desde la página “web” <http://www.ies-def.upm.es>

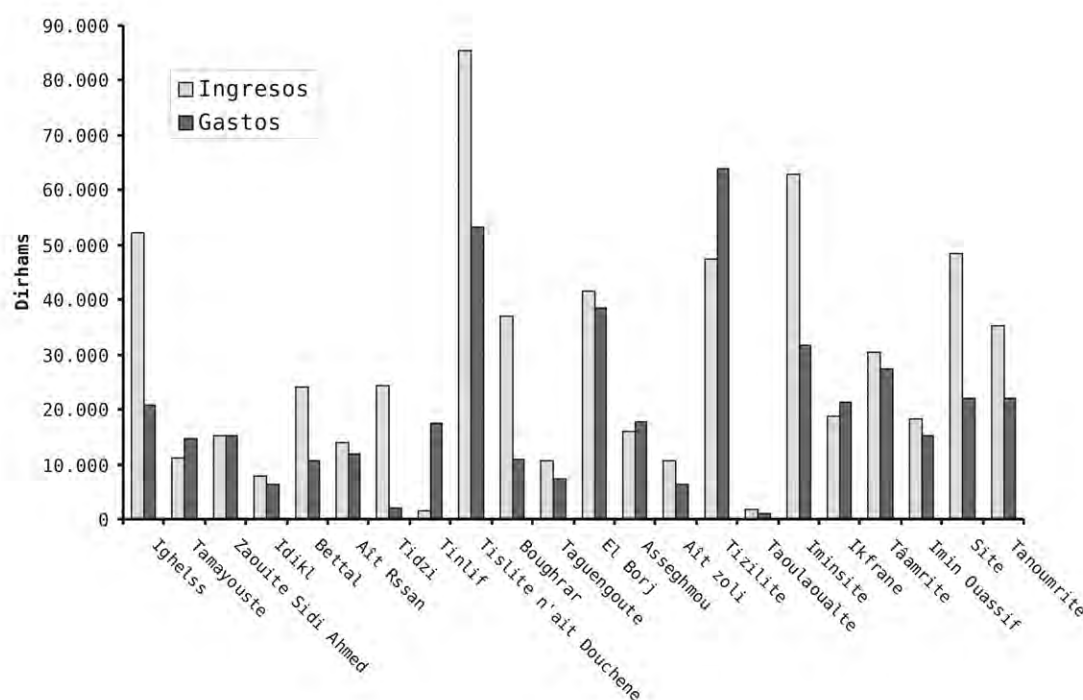


Figura 33: Comparación entre los gastos e ingresos para los pueblos de los que hay datos actualizados en Marruecos (1€ ≈ 10 dirhams).

La figura muestra la relación entre gastos e ingresos para la mayoría de los pueblos incluidos en el proyecto MEDA (aquellos de los que se disponen datos actualmente). En general la situación es de superávit para la mayoría de ellos. Es necesario poner en contexto esta situación. Los proyectos que ha encadenado el IES-UPM en la zona (incluyendo el MEDA que nos ocupa) han sido la causa de que las asociaciones de usuarios hayan establecido una tarificación para el cobro del agua consumida, y consecuentemente una cuenta bancaria como soporte de los cobros y pagos. En principio, el dinero recaudado bajo este concepto está destinado a cubrir las necesidades surgidas de los sistemas de bombeo (gastos fijos, como guardián o lejía, o variables como reparaciones o reposiciones), pero con el devenir del tiempo las asociaciones han utilizado este dinero como recurso utilizable para otras incidencias habidas en el pueblo, por ejemplo reparaciones en escuela, mezquita, caminos, etc. Evidentemente esto ha sido posible, por un lado, gracias a que han visto un excedente de dinero en las cuentas, y por otro lado, a la tardanza con que llegaban los recursos para estas necesidades mediante los canales habituales (normalmente son peticiones a organismos oficiales).

Los casos más llamativos de los mostrados en la figura, Tizilite y Tinlif, son debidos a que en el momento de hacer este resumen, habían hecho un gasto de esta naturaleza (reparación de infraestructuras) y por eso presentan este déficit importante.

La situación mostrada en la gráfica, y la experiencia y el seguimiento que se ha hecho estos años de las instalaciones tanto de los sistemas MEDA como de los anteriores, hace que seamos optimistas en lo que se refiere al establecimiento de una estructura de mantenimiento y a la durabilidad de los sistemas.

Creemos necesario un último comentario acerca de la tarificación llevada a cabo en el proyecto, esta vez, aplicable a los tres países involucrados. La norma general ha sido cobrar una cantidad adecuada al nivel medio de ingresos de los habitantes del pueblo, y penalizar los consumos excesivos. Esto se ha conseguido gracias a tarifas por tramos en las que en el primer tramo se garantiza el suministro de agua para las necesidades básicas a precios razonables, y en los siguientes el precio aumenta apreciablemente (en muchos casos supera el 50% del precio en el primer tramo) penalizando de esta manera los consumos excesivos. La característica más importante de estas tarifas es que, en todos los casos, ha sido definida por los propios usuarios a través de sus asociaciones correspondientes.

### **5.6.3.2. La formación de los usuarios**

En este apartado nos limitaremos a presentar algunas reflexiones derivadas de nuestra propia experiencia sobre formación de usuarios en lo que respecta a la higiene del agua y a la gestión de sus infraestructuras. Como en todo proceso educativo, no se puede aspirar a obtener resultados inmediatos de la mera celebración de reuniones de trabajo en las que el promotor del proyecto diserta sobre la estrecha relación entre las enfermedades y la calidad sanitaria del agua, o sobre la importancia de cotizar a una cuenta para garantizar el mantenimiento. Para que resulte eficaz, el proceso educativo ha de ser algo mucho más continuado, abierto y recíproco. El “educador” debe mantenerse en estrecho contacto con la realidad en la que se desarrolla el proyecto, hasta entender sus entresijos y razones, y hasta lograr que la comunicación con los “educandos” se establezca en términos que resulten comprensibles para éstos y exciten su curiosidad. Ahora bien, como quiera que sea, en algún momento deberá pergeñar algo parecido a un guión que le permita ser sistemático en la acción.

Nosotros lo hemos hecho cuando, ya en una fase avanzada del proyecto MEDA, tuvimos reuniones sistemáticas con todos los usuarios. Previamente, las bombas habían demostrado su buen funcionamiento y nosotros habíamos analizado cuidadosamente el uso del agua que hacían las poblaciones. Así, unos y otros sabíamos bastante bien de lo que hablábamos en esas reuniones. Para introducir los temas, preparamos unas diapositivas de apoyo, que presentamos en este apartado, en la esperanza de que, junto con los correspondientes comentarios, sirvan mejor que otra cosa para acercar al entendimiento del lector lo que pensamos que ha sido, y todavía está siendo, una experiencia educativa positiva de la que se pueden extraer algunas lecciones de validez general.

Los usuarios perciben el problema de la higiene del agua de forma muy diferente a como lo perciben los promotores de los proyectos. Esto representa una dificultad importante en cualquier proceso de comunicación, ya que supone tanto como intentar convencer de que tiene un problema a alguien que no lo siente así. Para combatir esta dificultad:

- Las iniciativas de formación de usuarios deben esperar hasta que los usuarios confíen en la bondad de la nueva tecnología, y a que se haya establecido un clima de confianza con los promotores del proyecto.

- El discurso debe apoyarse en elementos observados sobre la realidad cotidiana de los usuarios. Tanto los esquemas como las fotografías de las diapositivas incluidas en este apartado no son más que un ejemplo adaptado a la realidad particular de las bombas fotovoltaicas implantadas por este proyecto MEDA en el Magreb. Su correcta comprensión exige tener presente que los sistemas de suministro incluyen distribución de agua hasta el interior de cada vivienda, y que aprovechan buena parte de las infraestructuras existentes con anterioridad, generalmente asociadas a bombas diesel. Hay que insistir en que, si bien el hilo argumental presentado aquí puede tener mucho de general, cada proyecto concreto debe desarrollar sus propios instrumentos adaptados a las peculiaridades de su realidad.
- Las recomendaciones concretas deben apoyarse en el contraste entre buenos y malos ejemplos, siempre observados en la realidad. A los beneficios didácticos derivados de enseñar lo que se hace mal y cómo mejorarlo, se suma el de fomentar una especie de competencia sana entre los usuarios, en pos del prestigio asociado al reconocimiento público de hacer bien sus “tareas”.

El discurso presentado aquí se fundamenta en dos ideas básicas. Por un lado, que la limpieza del agua es un bien en sí mismo, además de repercutir positivamente en la salud. Por otro, que el agua está limpia en el origen (esto debe ser siempre verdad si el proyecto ha elegido adecuadamente la fuente de agua) y que, por tanto, hay que evitar que se ensucie en el trayecto hasta la mesa. La presentación de estas ideas ha sido así:

Diapositiva 1. Describe la tecnología anterior al proyecto fotovoltaico, poniendo de manifiesto su propensión para ensuciar el agua. En el caso del Maghreb, tanto las cuerdas y calderos como las bombas diesel de eje vertical obligan a acceder frecuentemente al agua, por lo que los pozos se mantienen continuamente abiertos y resultan propensos a la entrada de suciedad, que puede provenir tanto del entorno (los pájaros defecando directamente sobre los pozos son una realidad) como de los propios medios de extracción (cuerdas y calderos sucios, vertidos de combustible y aceite, etc.). Esto permite presentar el problema no tanto como fruto de la ignorancia o la desidia de las personas, sino como fruto de las circunstancias en las que se ven obligados a vivir. Si lo primero suena a acusación, y puede provocar rechazo, lo segundo suena a comprensión, y puede fomentar confianza (ver figura 34).





Figura 34: Diapositiva 1

Diapositiva 2. Describe la tecnología asociada al proyecto fotovoltaico, destacando que ya no es necesario acceder al agua antes del punto de distribución, el potencial de limpieza que se deriva de ello, y los puntos donde existe riesgo de entrada de suciedad (ver figura 35).

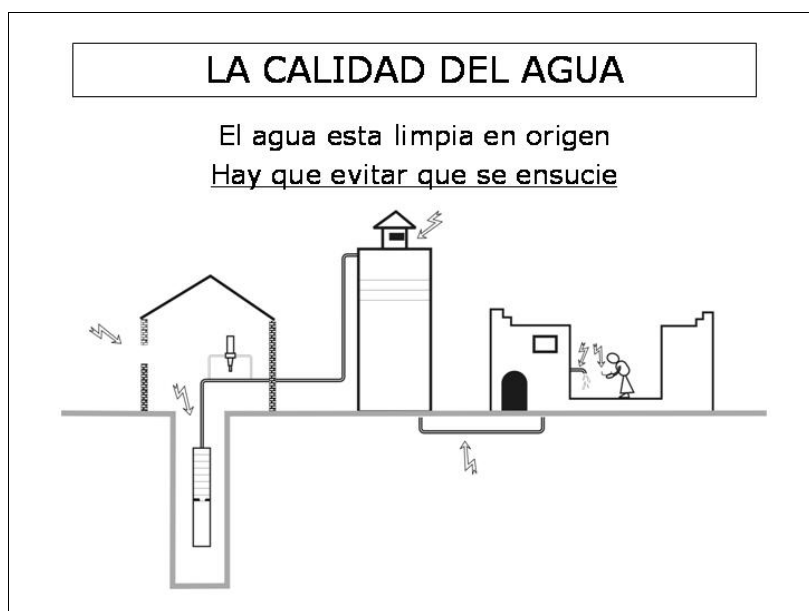


Figura 35: Diapositiva 2

Diapositiva 3. Describe la fuente actual de agua y los cuidados a tomar para protegerla de la entrada de suciedad. Importa detectar posibles malos hábitos heredados de la



situación anterior, e insistir en que no deben trasladarse a la nueva. Por ejemplo, en el Magreb está muy extendida la idea de que los pozos deben “respirar” y de que para ello conviene que los pozos no dispongan de tapa alguna (lo que se puede interpretar como una forma de facilitar la extracción). Haciéndonos eco de esa creencia, hemos explicado que los pozos pueden respirar simplemente a través de las pequeñas aberturas que siempre acompañan a tapas, pasos de tuberías, etc (ver figura 36).



*Figura 36: Diapositiva 3*

Diapositiva 4. Describe el depósito actual del agua enfatizando el hecho de que, por su propia ubicación, se trata de un elemento muy expuesto a la entrada de insectos, que tienen un gran potencial para ensuciar el agua. Por ejemplo, en el Magreb son, lamentablemente, frecuentes las plagas de langosta, y estas se combaten con pesticidas. La gente es consciente de que los pesticidas no son buenos para las personas (de hecho han abandonado el hábito, en otro tiempo muy extendido, de comer tales langostas). El hallazgo de langostas muertas en el interior de algunos depósitos carentes de protección frente a la entrada de insectos, fue aprovechado en términos didácticos para insistir en la necesidad de esa protección. En el mismo orden de cosas, conviene enfatizar el hecho de que, debido a sus grandes paredes y a las tuberías que las atraviesan, los depósitos son propensos a presentar fugas de agua. Los consiguientes charcos resultan atractivos para insectos y animales en general (perros, asnos, etc.) de donde, otra vez, el riesgo de contaminación y la necesidad de reparar las goteras con prontitud, de restringir el acceso al depósito, y de prever canales que recojan las posibles fugas de agua y las conduzcan a algún lugar controlado. La diapositiva incluye también una fotografía de un rebosadero modificado, para explicar el problema descrito en la sección 3.2.7 (ver figura 37).

Diapositiva 5. Describe la red de tuberías, poniendo de manifiesto que la forma más inmediata de tenderlas, consistente en seguir el trazado de los caminos y enterrarlas a escasa profundidad, es, precisamente la más propensa a ocasionar fugas, particularmente si



Figura 37: Diapositiva 4. El depósito

la tierra que rellena las zanjas contiene elementos punzantes, como piedras con cantos agudos que, ayudados por el peso de las personas y animales que transitan por encima, se convierten en auténticos perforadores de tuberías. Algunas de las redes de distribución heredadas de la situación anterior al proyecto MEDA sufrían fugas prácticamente todas las semanas, por lo que los usuarios percibían este hecho como un problema real, aunque no fueran conscientes de que, además de originar pérdidas de agua y obligar a cortes en el suministro, para su reparación, las fugas permiten también la entrada de suciedad y contaminación si, como es frecuente, en sus inmediaciones existe material orgánico en descomposición (excrementos de animales, desechos de las viviendas, etc.)<sup>1</sup>. La extrema dureza del terreno en esta región dificulta mucho el recurso a profundizar las zanjas. Sin embargo, resulta muy fácil encontrar arena en las inmediaciones de todos los pueblos –en los lechos de los “oued”–; así que nuestra propuesta de enterrar las tuberías en una capa de arena, que amortigua mucho el efecto de aquellos perforadores de tuberías, fue bien recibida y, afortunadamente, se ha mostrado como una medida muy eficaz (ver figura 38).

1.- Esto sucede cada vez que por razón de avería, mantenimiento, etc., se para el bombeo y por tanto desaparece la presión del agua. Ello permite que la humedad que rodea a las fugas se difunda al interior de las tuberías.



Figura 38: Diapositiva 5

## 5.7. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha mostrado la aplicación de la estrategia de control de calidad propuesta en los anteriores en un programa de bombeo fotovoltaico que abarca tres países (Marruecos, Argelia y Túnez).

El proyecto ha sido financiado por la Unión Europea y la Agencia Española de Cooperación internacional, dentro de sus respectivos programas de ayuda, MEDA para la UE y Azahar en el caso de la AEIC.

El proceso que garantiza la calidad en los sistemas ha seguido los siguientes pasos:

1. Elección de las contrapartes idóneas en cada país. Los criterios globales más importantes son: cercanía a la población rural en cada región, y aceptación entre las estructuras oficiales del país. Su primera tarea ha sido la selección de los poblados beneficiarios, siempre siguiendo los criterios impuestos por el proyecto
2. Visita de verificación de los emplazamientos para comprobar su idoneidad.
3. Elaboración de unas especificaciones que persigan la fiabilidad de los sistemas a instalar. Especial atención han recibido las situaciones denominadas anómalas (llenado del depósito y vaciado del pozo) y las infraestructuras hidráulicas de los sistemas (detalles de los depósitos, distribución de agua, protecciones de equipos y corrección en los puntos de aprovisionamiento de agua). Igualmente se prevén en las especificaciones esquemas de gestión (con especial atención en el mantenimiento) que aseguren la duración en el tiempo de los bombeos.
4. Convocatoria de un concurso público según las normas internacionales impuestas por la Unión Europea.
5. Medida y prueba de prototipos en el laboratorio previas a las instalaciones en el

terreno.

6. Verificación temprana de las primeras instalaciones para resolver posibles problemas. La detección de éstos en las primeras fases resulta conveniente para evitarlos en las instalaciones subsiguientes.
7. Visita de recepción provisional, en la que se comprueba la calidad de la instalación y el servicio entregado en relación con lo especificado inicialmente.
8. Visita de recepción definitiva, en la que se busca verificar problemas traídos por el funcionamiento prolongado.

La ejecución de esta estrategia ha revelado como destacable las cuestiones siguientes:

- La medida y prueba de los equipos en el laboratorio, previamente a la instalación en el terreno verificó el servicio de agua de los sistemas respecto a una referencia previa. Algunos aspectos menores fueron detectados y corregidos oportunamente.
- Los ensayos sobre el terreno se desvelaron como los más útiles en términos de problemas encontrados y corregidos, especialmente en lo tocante a las infraestructuras hidráulicas.
- Una organización social en torno a los sistemas es de vital importancia para una gestión durable de los mismos.

Respecto a los resultados obtenidos tras la recepción de los últimos datos procedentes de los países participantes, principalmente Marruecos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los equipos fotovoltaicos, electrónicos y la bomba han presentado un comportamiento esperado: una tasa baja de averías, y las existentes son el resultado de la mortalidad infantil esperable en cualquier equipo en el comienzo de su vida.
- Tal y como se preveía, la mayoría de los problemas han venido de la parte no fotovoltaica, es decir, la distribución de agua a los hogares, abrevaderos o piscinas. Especialmente el caso de los puntos de aprovisionamiento de agua ha sido el que más esfuerzos ha requerido para adecuarlos a los estándares de calidad exigidos por el proyecto.
- Las asociaciones de usuarios están respondiendo satisfactoriamente a los requerimientos planteados al principio del proyecto: anotación de datos de operación, incidencias, pago de las tarifas establecidas y cuidado básico de los sistemas.

Finalmente se han expuesto las lecciones aprendidas tras la ejecución de este programa. Las más importantes en el campo de los equipos y los sistemas (“hardware”) han sido las relacionadas con las infraestructuras hidráulicas: depósitos, pozos y red de distribución de agua. Por otro lado, se ha concluido que las prioridades en el suministro de agua para los usuarios, en orden de importancia, son: fiabilidad del suministro, buen sabor, menor esfuerzo, y por último calidad sanitaria. Los patrones de consumo han coincidido con lo observado en otros proyectos similares, situándose el consumo entre los 20 y los 45 litros por persona y día, como corresponde al carácter en general aislado de los poblados.

Para terminar, nuestra experiencia nos dice que es útil dedicar el tiempo necesario a la formación de los usuarios en los detalles del sistema del agua (visto como la totalidad de elementos y reglas que constituye el suministro de agua en el poblado), de forma que les motive en su conservación y cuidado. Respecto a esto último, es importante destacar que esta formación debe realizarse cuando los usuarios confían en los sistemas, y que esta confianza viene de observar cómo el agua llega a sus hogares o puntos de suministro de una manera fiable.

## Capítulo 6

# Conclusiones y líneas futuras de investigación

---

### 6.1. Introducción

Los sistemas de bombeo fotovoltaico se han manifestado como una de las soluciones más adecuadas para el suministro de agua en lugares aislados en los que, entre otras infraestructuras, falta la de la red eléctrica. Ya ha pasado tiempo desde que se instaló el primer sistema fotovoltaico en Malí, y muchas mejoras se han ido implementando desde entonces (distintas tecnologías en los módulos solares, motores de inducción, bombas centrífugas o de desplazamiento positivo, convertidores DC/AC, etc). Nuestra experiencia sobre el terreno, ganada gracias al proyecto MEDA presentado en este trabajo, nos ha permitido percibir la buena acogida de este tipo de sistemas. En su inmensa mayoría los sistemas instalados han sustituido a otros que hacían uso de grupos diesel para accionar las bombas y lo han hecho de una forma muy fiable.

De una manera global, este trabajo ha contribuido al establecimiento de una estrategia de control de calidad para sistemas de bombeo fotovoltaico. Esta propuesta concibe un sistema de bombeo fotovoltaico como un todo cuya misión es suministrar un servicio de agua a una comunidad dada, en cantidad y calidad suficiente, y durante el mayor tiempo posible. Esta aproximación obliga a que se considere en igualdad de condiciones los equipos eléctricos (módulos, convertidores, etc), los hidráulicos (bombas, red de tuberías, etc), los sistemas de alarma y la organización que opera el sistema. Problemas en cualquiera de estas partes repercuten en la calidad del suministro de agua. Para la consecución de este objetivo hemos propuesto unas especificaciones técnicas y unos procedimientos de ensayo adaptados, por un lado, a los problemas de la tecnología

fotovoltaica en este tipo de aplicación, y por otro a la realidad socioeconómica de los países receptores de estos sistemas.

A continuación se van a recopilar las conclusiones obtenidas a lo largo de la tesis y se van a apuntar las líneas de trabajo que consideramos importante trazar para seguir avanzando en la consecución de un estándar de calidad elevado en los sistemas de bombeo fotovoltaico descentralizado.

## **6.2. Especificaciones técnicas de bombeo fotovoltaico**

En el capítulo 2 se ha propuesto una especificación técnica con el objetivo de garantizar la calidad de estos sistemas en la primera fase de cualquier proyecto.

Los sistemas de bombeo que cubren estas especificaciones tienen como objetivo las aplicaciones típicas: riego, abrevaje de ganado, pero también el consumo humano al contemplar en sus normas los sistemas de potabilización de agua. No cubren, sin embargo, los sistemas con almacenamiento de energía mediante baterías por ser este tipo de soluciones extremadamente escasas en el parque de bombeos instalados en la actualidad. Las especificaciones propuestas contienen la ya larga experiencia del IES-UPM ganada en diversos proyectos ejecutados en el sur de Marruecos, y parte de la que atesora el IEES de la Universidad de Sao Paulo, con la que mantenemos estrechos contactos en el campo del bombeo fotovoltaico. Incluye soluciones técnicas para cuestiones vitales como tuberías de distribución, sistemas potabilizadores de agua, protecciones ante situaciones anómalas, etc.

Este conjunto de normas además busca constituir una propuesta universal. El precio que se paga con la generalidad es la pérdida de perspectiva en lo referente a detalles particulares de cada proyecto. La propuesta va, pues, acompañada de una clasificación de las normas que permita a los promotores de proyectos de este tipo, adaptarlas a la realidad del proyecto concreto.

## **6.3. Modelado de sistemas de bombeo fotovoltaico**

En el capítulo 3 se propone un modelo que permite simular el servicio entregado por una bomba fotovoltaica a partir de las características técnicas proporcionadas por los fabricantes y de modelos de las distintas partes de del sistema, seleccionados por su aceptación generalizada en la comunidad fotovoltaica.

Los resultados de la herramienta de simulación han sido validados con datos experimentales extraídos de ensayos de bombas funcionando en el banco de medida desarrollado en el IES. Para la obtención de los resultados se han utilizado varias bases de con distintas escalas temporales (de minuto en minuto, de diez en diez minutos, cada media hora y con datos diarios) llegando a la conclusión, tras el análisis de los resultados, que la utilización de los 12 valores medios mensuales de irradiación global conducen a

precisiones mejores que el 2%.

Finalmente, se ha realizado un ejemplo de aplicación de la herramienta de simulación para mostrar la influencia de la variación de la altura manométrica total de bombeo en el volumen total de agua bombeada.

## **6.4. Procedimientos de ensayo**

En el capítulo 4, se han definido los procedimientos de ensayo que permiten comprobar las especificaciones propuestas en el capítulo 2. Se han reordenado para seguir la secuencia de ensayos que normalmente se siguen en los programas de bombeo. La operativa de los ensayos ha sido descrita para cada uno de ellos, indicando en cada caso los resultados a registrar.

Asimismo se han descrito la instrumentación utilizada para la implementación de estos ensayos. Como es habitual en el IES-UPM se han utilizado aparatos sencillos y económicos que permitan diseminar al máximo la realización de controles de calidad, especialmente en los países en los que se realizan programas de bombeo fotovoltaico.

## **6.5. Puesta en práctica del procedimiento de control de calidad en un programa de bombeo real.**

En el capítulo 5, se ha mostrado la aplicación de la estrategia de control de calidad propuesta en esta tesis, en un programa de bombeo fotovoltaico que abarca tres países (Marruecos, Argelia y Túnez).

El proyecto ha sido financiado por la Unión Europea y la Agencia Española de Cooperación internacional, dentro de sus programas MEDA y Azahar, respectivamente. Se han instalado un total de 257,3 kW<sub>p</sub>, en 52 instalaciones, y que sirven las necesidades de agua para irrigación, consumo ganadero y consumo humano para unas 50.000 personas.

El control de calidad ha incluido una verificación de los lugares elegidos para las instalaciones, la selección (siguiendo los estándares prescritos por la Unión Europea) de la empresa encargada de la instalación, la verificación de prototipos en el laboratorio, la visita temprana de los sistemas sobre el terreno, y la aceptación final de los mismos tras un año de funcionamiento.

Este esquema ha permitido ir resolviendo problemas en los equipos desde el principio. Cada etapa ha servido para detectar problemas de distinta índole, los ensayos en el laboratorio desvelaron los relacionados con los componentes tanto de manera aislada como formando parte del sistema, y los del terreno los problemas de integración con la fuente de agua y la infraestructura hidráulica.

Adicionalmente se han diseñado los mecanismos que permiten la puesta en marcha de estructuras de mantenimiento. Parte de esta estructura consiste en el establecimiento de



tarifas de cobro por el agua bombeada. Los usuarios llevan un registro exhaustivo del agua bombeada y consumida. El análisis de estos registros ha confirmado el patrón de consumo general de entre 20 y 45 litros por persona y día para comunidades aisladas.

## **6.6. Futuras líneas de trabajo**

Aún quedan muchas líneas en las que trabajar para avanzar hacia una calidad en los bombeos fotovoltaicos descentralizados. En lo referente a las especificaciones técnicas propuestas:

- Extender las dichas especificaciones tanto a nuevos productos (bombas helicoidales, por ejemplo), como a nuevos ámbitos de aplicación: bombas de pequeña potencia, grandes riegos eficientes, desalinización, etc.
- Incrementar la robustez de la programación del convertidor de frecuencia ante transitorios bruscos como los que suceden en los días de nubes y claros, y desarrollar las especificaciones técnicas y los procedimientos de ensayo que permitan su comprobación.
- Investigar una metodología que permita el ajuste sencillo del convertidor AC/DC a las características dinámicas del pozo en su emplazamiento final.
- Desarrollar algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia que se puedan implementar en los convertidores de frecuencia comerciales.

En el campo de la parte hidráulica de los sistemas:

- Profundizar en el estudio de la dinámica de los pozos abiertos para proponer procedimientos que permitan prever y corregir el problema de “pozo seco”.

En lo referente a los usuarios:

- Contrastar los patrones de consumo y las prioridades observadas en los usuarios con datos de otras regiones geográficas y climáticas del mundo.
- Implementar y evaluar esquemas de mantenimiento para garantizar la durabilidad de los sistemas.

## Referencias

---

- 1 Jean Gimpel. "La revolución industrial en la Edad Media". *Ed. Taurus, Madrid 1982.*
- 2 Eduardo Lorenzo, "Electricidad solar fotovoltaica. Volumen I: Sobre el papel de la energía en la historia", *Ed. PROGENSA, 2006.*
- 3 T.J. Derry y T.I. Williams, "Historia de la tecnología". *Ed. Siglo XXI, 1977.*
- 4 R.E. Adams, "Las antiguas civilizaciones del Nuevo Mundo". *Ed. Crítica, 2000.*
5. J.A. Tainter, "The collapse of complex societies". *Cambridge University Press, 1988.*
6. Ken Wright, Alfredo Valencia Zegarra. "Machu Picchu: A civil engineering marvel". *Civil engineering magazine. Enero 2001.*
7. Poul Polak, "Agricultura del tercer mundo". *Investigación y ciencia. "¿Hacia dónde va la humanidad?". Número monográfico, noviembre 2005. Pgs. 42-49.*
8. Cressey, George B. "Qanats, Karez, and Foggaras". *Geographical Review, vol. 48. Nº 1. American Geographical Society.*
- 9 Guillem Burrel i Florià, "Crónica de la técnica". *Plaza y Janés Editores S.A. Barcelona 1989.*
10. K. Bradley, "Esclavitud y Sociedad en Roma". *Ed. Península, 1988.*
11. I. González Tascón, "Fábricas hidráulicas españolas". *MOPT (1992).*
12. D. Hemery, J.C. Debier, J.P. Dleage, "Les servitudes de la puissance: une histoire de l'énergie". *Ed. Flammarion. 1986.*
13. I. González Tascón, "Ingeniería española en ultramar". *Ed. CEHOPU, 1992.*
14. Gille, B. "Les mécaniciens grecs". *Éditions du Seuil, 1980.*
15. Auguste Mouchot. "La chaleur solaire". *Gauthiers-Villars, Imprimeur-librairie, 1869*
16. Charles Smith. "History of Solar Energy". *Technology Review. July. 1995*

17. John Perlin. "From Space to Earth". *Aatec publications, Michigan. 1999*
18. María Cristina Fedrizzi, Ido Luis Sauer. "Bombeamento Solar Fotovoltaico, Histórico, Características e Projectos". *Universidade de Sao Paulo. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. 2002.*
19. <http://www.cilss.bf/prs/>
20. Liebard A. "Regional Solar Program. Lessons and Perspectives", *Foundation Energies pour le Monde, Paris. 1999*
21. Mahmoud MM. "Experience results and techno-economic feasibility of using photovoltaic generators instead of diesel motors for water pumping from rural desert wells in Jordan". *IEEE Proc. 1990*
22. Kaunmuang P, Kirtikara K, Songprakorb R, Thepa S, Suwannakum T. "Assessment of photovoltaic pumping systems in Thailand-one decade experience". *Solar Energy Materials & Solar Cells. 2001.*
23. Fedrizzi, M.C., "Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão". *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2003.*
24. Jesús Fraile Mora, "Máquinas eléctricas". *McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid. 2003.*
25. M. Alonso Abella, E. Lorenzo, F. Chenlo. "PV water pumping systems based on standard frequency converters". *Progress in Photovoltaics: Research and applications. Volume 11, Issue 3, Date: May 2003, Pages: 179-191*
26. SOPRA-RE, "Social Practice for Renewable Energy Systems in Rural Electrification". *Project number 4.1030/Z/01-086/2001, European Commission, 2001.*
27. Nasir El Hak R. A. "Expérience Marocaine dans le domaine du Pompage par Energie Solaire Photovoltaïque". *Proceedings of the International seminar: Pompage Photovoltaïque et traitement de l'eau en milieu rural, Ouarzazate, Morocco, 2003;9-14.*
28. Narvarte L., Lorenzo E., Aandam M. "Lessons from an PV Pumping Programme in South Morocco". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2005; 13: 261-270.*
29. Cota A.D., Foster R.E., Gómez L.M., Ross M.P., Hanley C.J., Gupta V.P., Montúfar O., Romero A. "Ten year Reliability Assessment of Photovoltaic Water Pumping Systems in Mexico", *Solar 2004, American Solar Energy Society, Portland, Oregon, 2004, 113-118.*
30. Barbosa, E.M., Fraidenraich, N. "Periodic Evaluation of Photovoltaic Electrification Systems Performance in Northeast of Brazil: Third Year". *14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 1997.*
31. "Abastecimiento de agua para el fomento de la salud y formación sanitaria en el valle del Draá" (fases I y II). Proyecto. *Comisión de la Unión Europea, responsables CIPIE, ISF, Tichka. Enero 1995-enero 1998.*
32. "Proyecto INCO: Clean water with clean energy". *Proyecto. Comisión de la unión*

europaea. Responsable: IES. Octubre 1996-abril 2000

33. "Potabilización de agua y fomento de la salud en veintidós comunidades rurales". *Ayuntamiento de Madrid. Responsables: CIPIE, Tichka, IES.* Febrero 2001-Febrero 2002.
34. "Mejora de la calidad de vida mediante el acceso a agua potable y electricidad". *AECI, Responsable: CIPIE. Enero 2001- Junio 2003.*
35. "Acción de acompañamiento: Best practices for PV water pumping and purification programmes. Lessons from selected experience in Morocco". *Comisión de la Unión Europea. Responsable: IES. Septiembre 2001-junio 2003.*
36. "MEDA: Implementation of a PV water pumping and purification program in Mediterranean countries". *Comisión de la Unión Europea. Responsable: Comisión de la Unión Europea. IES. Enero 2002-Diciembre 2004.*
37. Instituto de Energía Solar. Universidad Politécnica de Madrid. "Universal Technical Standard for Solar Home Systems". *Thermie B SUP 995-96, EC-DGXVII, 1998.*
38. Lorenzo, E. "Photovoltaic Rural Electrification". *Progress in Photovoltaics. Vol 5. 1997.*
39. "Market Survey on solar pumps". *Photon International, December, 2004.*
40. Narvarte L, Lorenzo E, Aandam, M. "Lessons from a PV pumping program in South Morocco". *Progress in Photovoltaics, Vol. 13. 2005.*
41. Narvarte L, Lorenzo E, Aandam M. "Patrones de bombeo de agua en sistemas rurales de bombeo fotovoltaico". *Era solar. Num. 109. Julio/Agosto 2002.*
42. Iqbal, M. "Introduction to Solar Radiation". *Ed. Academic Press. 1983.*
43. Narvarte L, Lorenzo E, Caamaño E. "PV pumping analytical design and characteristics of Boreholes". *Solar Energy. Vol. 68, Nº 1. 2000.*
44. Lorenzo E, Poza F, Narvarte L, Fedrizzi C, Aandam M, Zaoui, S. "Buenas prácticas en la implantación de sistemas fotovoltaicos de bombeo". *IES, Madrid 2005.*
45. A. Hahn, "Photovoltaic water pumps. Lessons learned from demonstration and field testing projects supported by GTZ". *Proceedings of the Workshop on PV Water supply System Improvement (STR/1229/97-DE), Marrakech, 1998.*
46. "Philippines: Rural Power Project". <http://www.rpp.com>
47. Stuart, W., Green, M, Muriel, W., Corkish, R. "Applied Photovoltaics". *Pg. 82. Earthscan (James & James Ltd.). Cornwell, 2007.*
48. Lorenzo, E.. "Electricidad solar fotovoltaica. Volumen II: Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos". *Ed. Progensa. Sevilla, 2006.*
49. Badescu V. "Time dependant model of a complex PV water pumping system", *Renewable Energy 28 (2003); 543-560.*
50. Amer E., Younes M., "Estimating the monthly discharge of a photovoltaic water pumping system: model verification". *Energy conversion and management 47 (2006); 2092-2102.*
51. Illanes R., De Francisco A., Torres J., De Blas M., Appelbaum J. "Comparative study

- by simulation of photovoltaic pumping systems with stationary and polar tracking arrays”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11 (2003), 453 – 465
52. Hamidat A., Benyoucef B., Hartani T. “Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions”. *Renewable Energy* 28 (2003); 1081-1096.
53. Hadj Arab A., Benghanem M., Chenlo F., “Motor.pump system modelization”. *Renewable Energy* 31 (2006); 905-913.
54. Ghoneim A., “Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems”. *Energy Conversion and Management* 47 (2006); 1449-1463.
55. Panigrahi B., Prasad D., SenGupta S. “A simple hardware realization of switching table based direct torque control of induction motor”. *Electric Power Systems Research* 77 (2007); 181-190
56. Daud A., Mahmoud M. “Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests”. *Renewable Energy* 30 (2005); 701-714.
57. Mermoud A. “Pump behaviour modelling for use in a general PV simulation software”. *Proceedings of the 19<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference, Paris, 2004*.
58. Hamrouni N., Jraidi M., Cherif A., Dhoub A., “Measurements and Simulation of a PV pumping system parameters using MPPT and PWM control strategies”, *Proceeding of the IEEE MELECON, Benámádena, 2006*; 885-888.
59. Odeh I., Yohanis Y., Norton B. “Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance”. *Solar Energy* 80 (2006); 51-64.
60. Klein S., “TRANSYS Users Manual”. *University of Wisconsin Solar Energy Laboratory, Madison, 1996*.
61. Kou Q., Klein A., Beckman W. “A method for estimating the long term performance of direct coupled PV pumping system”. *Solar Energy* 64(1-3); 33-40.
62. Mayer O., Baumeister A., estlT. “Design, simulation and diagnosis of photovoltaic pumping systems with DASTPVPS”. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> European PV Solar Energy Conference, 1995*; 1915-1917.
63. Para una revision reciente de tales propuestas véase: R.P. Kenny, E.D. Dunlop, H.A. Ossenbrink and H. Müllejans, “A Practical Method for the Energy Rating of c-SI Photovoltaic Modules Based on Standard Test”, *Progress in Photovoltaics*, 14, 2, pág 155-167 (2006).
64. W. De Soto, S.A. Klein, W. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Solar Energy*, pág 78 – 88, (2006).
65. B.Y.H Liu y R.C. Jordan, “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation”, *Solar Energy. Volumen 4. 1960*.
66. Erbs, D. G. , S. A. Klein, and J. A. Duffie. “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation”. *Solar Energy* 4: 293-302. 1982.
67. J.E. Hay, D.C. McKay, “Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies”. *Int. J. Solar Energy*, 3. (203)1985
68. J.M. Ruiz, N. Martin, “Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model”. *Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 70, Issue 1, December 2001. Páginas, 25-38*

69. I.J. Karassik. "Pump handbook". *McGraw-Hill. Nueva York. 2001.*
70. J. Boland y M. Dik, "The level of complexity needed for weather data in models of solar system performance", *Solar Energy*, 71, N° 3, pp. 187-198, 2001
71. G. Vijayakumar, M. Kummert, S.A. Klein, W.A. Beckman, "Analysis of short-term solar radiation data", *Solar Energy*, 79, pp. 495-504, 2005.
72. "PV Solar Home Systems. Qualification testing procedure". *Instituto de Energía Solar. 2001.*
73. ISO 9905, "Technical specifications for centrifugal pumps. Class I".
74. ISO 5199, "Technical specifications for centrifugal pumps. Class II".
75. ISO 9908, "Technical specifications for centrifugal pumps. Class III".
76. IEC 1702, "Rating of direct coupled photovoltaic pumping systems".
77. ISO 4422-2, "Pipes and fittings made of unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) for water supply".
78. Luis Narvarte. "Hacia un paradigma de electrificación rural descentralizada con sistemas fotovoltaicos". *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2001.*
79. Muñoz, J, Lorenzo, E. "Capacitive load based on IGBT's for on-site characterization of PV arrays". *Era Solar*, n° 127, junio/julio 2005.
80. Brito, A.U., Fedrizzi, M.C., Zilles, R. "PV pumping systems: a useful tool to check operational performance". *Progress in photovoltaics: Research and applications. Volume 15, January 2007, Pages:41-49.*
81. Rogers, M. "Diffusion of innovations". *The free press. Nueva York 1995.*
82. Thomas D. Jordan Jnr. "A Handbook of Gravity-flow Water Systems". *Intermediate Technology Publications Ltd. Warkwickshire, 1984*
83. Bakri, M, Acharai, A. "Expérience Marocaine dans le domaine du Pompage par Energie Solaire Photovoltaïque. Seminaire International: Pompage Photovoltaïque et traitement de l'eau en milieu rural". *Seminaire de pompage photovoltaïque. Ouarzazate, julio 2005*
84. Moore L., Post H., Adams K., Malczynski L., Hauck R., Jespersen T., Skinner R., Anderson J. "Operation and maintenance field experience with photovoltaic water pumping systems". *Proceedings of ISEC 2005. Orlando, 2005; 1-5.*
85. "Programme Regional Solaire: enseignements et prespectives", 25-28, *CILSS, Ouagadougou, 1999.*
86. Zilles, R. Morante, F. "Ah. Meter: a useful tool for user demand management". *Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. Pags 2080-2082. Munich, 2001.*
87. "Guidelines for drinking water quality. First addendum to third edition". *World Health Organization. First addendum to third edition. 2006*
88. Gleick P, "The Human Right to Water". *Water Policy. Elsevier Science. 1999.*

## 8. Anexo I. Especificaciones técnicas utilizadas en el proyecto MEDA

---

**ANNEXE II**  
**ANNEXE TECHNIQUE**



## **ARTICLE 1 : OBJET DE L'APPEL D'OFFRES - PRESENTATION DU PROGRAMME**

Le présent appel d'offres a pour objet la fourniture et l'installation de systèmes photovoltaïques de pompage. Sont aussi incluses les prestations relatives à la mise en marche et à la maintenance. Son principal objectif est de fournir de l'eau potable pour les zones rurales par le biais d'une énergie propre, l'énergie solaire photovoltaïque.

Le projet est basé sur deux principes fondamentaux :

- Garantir la qualité technique des installations
- Garantir la maintenance à long terme des installations

En vertu de ce deuxième principe directeur, il a été décidé de concentrer les installations dans des régions peu étendues. Les sites ont été soumis à un processus de sélection rigoureux tenant compte de l'existence d'une structure organisationnelle devant faciliter la maintenance des installations.

Compte tenu de l'importance portée à la qualité technique des installations, seuls des matériaux et composants dûment éprouvés seront proposés. Pour chaque offre, une standardisation et une uniformisation des installations seront favorisées. Afin de tester cette qualité, l'adaptation des systèmes aux conditions locales et leur conformité aux spécifications mentionnées dans cette annexe technique, des bancs d'essai seront mis en place. La transformation de l'attribution provisoire en attribution définitive nécessitera la confirmation de l'observation de ces spécifications techniques et le résultat positif à ces tests.

Finalement, lors de l'évaluation des propositions des soumissionnaires, une attention particulière sera portée à la partie de l'offre relative à la maintenance des installations.

## **ARTICLE 2 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES SYSTEMES DE POMPAGE**

### **2.1 SYSTEMES DE POMPAGE**

#### **2.1.1 Description générale des systèmes**

- a) Tous les systèmes photovoltaïques de pompage faisant l'objet du présent appel d'offres doivent fonctionner "au fil du soleil", sans accumulateurs.
- b) Les systèmes de pompage doivent comporter des pompes immergées.
- c) Les pompes, à l'instar du reste du matériel, doivent être dûment éprouvées.
- d) Les générateurs photovoltaïques doivent satisfaire à la norme IEC 61215.
- e) Typologie des systèmes : les 6 types de systèmes standardisés retenus et présentés en Tableau 1 sont caractérisés par leur service ( $\text{m}^4/\text{jour}$ , **produit du débit journalier par la hauteur manométrique moyenne**). Ce service est

caractérisé par quelques paramètres de référence qui sont spécifiés pour chacun des systèmes. Cette typologie répond à la nécessité d'orienter les soumissionnaires sur la taille des systèmes et de comparer les offres. Cependant, les systèmes définitifs, détaillés par la lettre de commande, pourront varier par rapport à ce qui est spécifié en figure 1. Enfin, cette standardisation est basée sur la proposition de puits présentée, à titre indicatif, dans le chapitre 4.4.

Type	Service (paramètres de référence)
MEDA 1	850 m <sup>4</sup> /jour (20 m <sup>3</sup> /jour, 42 m)
MEDA 2	1750 m <sup>4</sup> /jour (30 m <sup>3</sup> /jour, 58 m)
MEDA 3	2600 m <sup>4</sup> /jour (30 m <sup>3</sup> /jour, 87 m)
MEDA 4	5500 m <sup>4</sup> /jour (50 m <sup>3</sup> /jour 110 m)

Tableau 1. Standardisation des systèmes

Les valeurs du tableau 1 doivent être considérées comme valeurs minimales que les équipements devront atteindre dans les conditions d'utilisation les plus défavorables.

Cette condition affectera en particulier la puissance des générateurs photovoltaïques. Ces derniers devront en effet être en mesure de satisfaire les conditions de service (Tableau 1) avec la valeur minimale de puissance admise par la tolérance sur les caractéristiques des modules solaires.

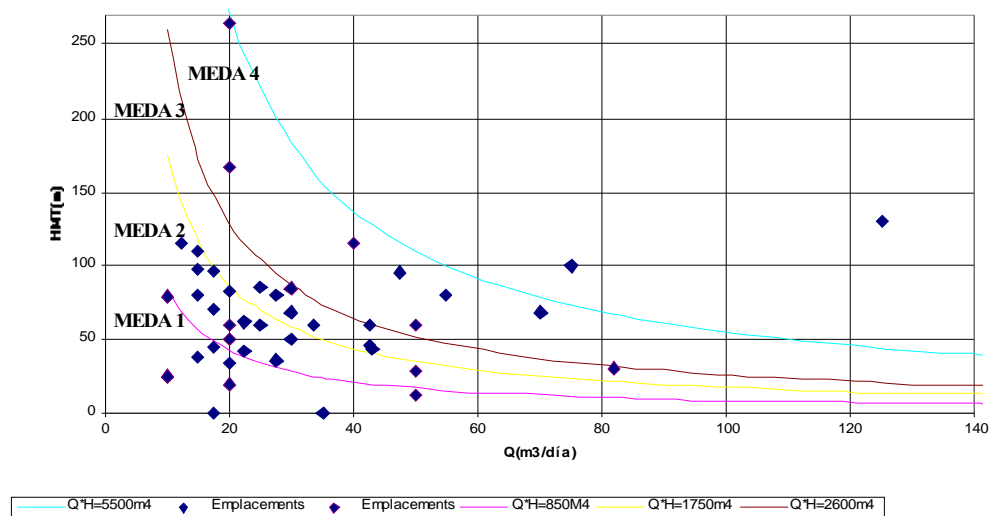


Fig.1. Standardisation des systèmes (conformément aux données provisoires des sites).

## 2.1.2 Conditions générales d'installation

### 2.1.2.1 Généralités

Les équipements à fournir sont destinés à fonctionner dans des sites souvent isolés. Ils doivent donc être conçus pour requérir la maintenance la plus réduite possible.

Les conditions climatiques générales se caractérisent par des températures ambiantes fréquemment élevées, souvent au-dessus de 45°C, et par un fort rayonnement solaire tout au long de l'année. Des tempêtes de sable sont aussi habituelles.

L'attributaire sera responsable de :

- l'installation sur site de l'ensemble des équipements correspondant aux systèmes de pompage photovoltaïque et aux systèmes de potabilisation,
- de la fourniture des matériels relatifs aux réseaux de distribution jusqu'aux maisons individuelles, à l'exclusion des ouvrages de captage (puits) et du réservoir qui relèvent de la responsabilité du maître d'ouvrage local.

La responsabilité de l'attributaire, quant à la réalisation des infrastructures de distribution de l'eau (réseaux de distribution, etc.), se limitera à la fourniture du matériel et sera spécifiée dans chaque lot (la réalisation des tranchées et l'installation de la tuyauterie seront de la responsabilité du maître d'ouvrage local). Ainsi, même si l'attributaire doit fournir le matériel du réseau de distribution, sa responsabilité, en ce qui concerne l'installation, s'arrête à l'entrée du réservoir, y compris les dispositifs d'arrêt de la pompe sur signal de trop plein du réservoir.

Les travaux de génie civil requis et devant être réalisés par l'attributaire sont les suivants :

- *De manière générale,*
  - Les fondations des structures-support des générateurs photovoltaïques,
  - Les clôtures des installations (il y a lieu de les réaliser selon les traditions locales, une sous-traitance aux compétences locales sera souhaitée),
  - La construction d'un local technique devant contenir le puits et le convertisseur (il y a lieu de les réaliser selon les traditions locales, une sous-traitance aux compétences locales sera souhaitée),
  - Les travaux relatifs au montage des systèmes, le possible démontage des installations de pompage existantes, l'installation des têtes de puits, des conduites d'eau à la sortie de la pompe, l'installation des convertisseurs, les connexions électriques, la mise à la terre, etc.
- *Selon les lots, et occasionnellement :*
  - Les travaux d'adduction complémentaires.

Le maître d'ouvrage local s'engage à mettre à la disposition de l'attributaire dans les délais nécessaires :

- Le puits ou le sondage perforé,
- Un réservoir,
- Un terrain pratiquement horizontal et totalement libre d'ombres au voisinage de l'installation.

Les systèmes de pompage fournis au titre du marché consécutif au présent appel d'offres sont destinés à être installés sur des forages de petit diamètre ou sur des puits ouverts de diamètre supérieur à 800 mm.

#### **2.1.2.2 Systèmes pour forages**

Les forages sur lesquels seront installés les équipements photovoltaïques sont tubés au moyen de tubes PVC ou acier, crépines au droit des venues d'eau. Le diamètre intérieur des tubes n'est pas inférieur à 110 mm.

Les puits ouverts aptes à l'installation de pompes photovoltaïques auront un diamètre supérieur à 800 mm sur toute la longueur.

En tout état de cause, le diamètre des pompes fournies doit être tel que, munies de tous leurs accessoires et en tenant compte de toutes les sujétions, elles puissent être installées dans des tubes en diamètre intérieur 110 mm.

Dans tous les cas, la différence de profondeur entre l'entrée de l'eau à la pompe et le fond du puits sera supérieure à 2 m.

L'eau des forages présentera une turbidité telle que le diamètre de la tache de sable mesuré au fond d'un seau de 10 litres n'excède pas 2 cm. L'eau des forages peut être agressive. Les matériaux corrodables sont donc proscrits pour toutes les parties en contact avec l'eau.

Tous les forages destinés à recevoir un équipement de pompage photovoltaïque auront fait l'objet, préalablement à l'installation de cet équipement, d'un développement et d'un essai de pompage exécuté dans les règles de l'art, dont la réalisation est de la responsabilité du maître d'ouvrage local, et ne fait pas partie du présent marché.

La tête du forage ou du puits et le convertisseur de la pompe seront abrités à l'intérieur d'un local technique construit selon les règles de l'art locales. Ce local sera réalisé selon les traditions locales, et une sous-traitance auprès de compétences locales sera souhaitée.

Le générateur photovoltaïque sera installé à proximité de la tête de forage, l'ensemble de l'installation de surface étant protégé par un enclos, dont la construction est à la charge de l'attributaire. Cette clôture sera réalisée selon les traditions de la population locale, et une sous-traitance auprès de compétences locales sera souhaitée.

D'une manière générale, la responsabilité de l'attributaire sur l'installation se limite à l'entrée de la tuyauterie du réservoir, incluant tous les composants nécessaires à la détection du niveau d'eau dans le réservoir et aux mises en marche ou arrêts de la pompe. Il est important de souligner que l'entrée de la tuyauterie au réservoir ne pourra se faire que par sa partie supérieure, afin de préserver l'étanchéité du réservoir.

#### **2.1.3 Conditions de référence**

##### **2.1.3.1 Note préliminaire**

En vue de faciliter la comparaison des offres, il est spécifié au présent paragraphe 2.1.3 les caractéristiques climatiques à prendre en compte pour le dimensionnement, ainsi que les dimensions-types des dispositifs spécifiées par les plans-type d'installation (voir

figures 2 et 3). Il est précisé que les paramètres réels d'installation pourront s'écarter de ces valeurs-type.

### 2.1.3.2 "Journée-type"

Tous les équipements proposés par le soumissionnaire seront dimensionnés dans l'offre pour satisfaire les demandes de débit journalier dans des conditions climatiques de référence définissant une "journée-type".

Ces conditions sont les suivantes :

- Température ambiante constante égale à 35 degrés Celsius,
- Vitesse du vent constante égale à 1 mètre par seconde,
- Irradiation : l'irradiation globale journalière reçue dans le plan des capteurs (soit 20° Sud) est égale à 6 kilowatt-heure par mètre carré (kWh/m<sup>2</sup>). La distribution de l'irradiation peut être calculée selon la norme IEC 61725 considérant les paramètres suivants : Hd (Irradiation journalière globale sur le plan du générateur) égale à 6 kWh/jour-m<sup>2</sup>, Gmax (Irradiation maximum au milieu de la journée) égale à 1000 W/m<sup>2</sup>, et h (nombre d'heures d'ensoleillement) égale à 12. Les résultats de la discrétisation de la distribution de cette irradiation, en la considérant constante tout au long de chaque heure, sont indiqués dans le tableau suivant :

Heure solaire (h)	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )
De 11 à 12 et de 12 à 13	983
De 10 à 11 et de 13 à 14	853
De 9 à 10 et de 14 à 15	629
de 8 à 9 et de 15 à 16	370
de 7 à 8 et de 16 à 17	146
de 6 à 7 et de 17 à 18	19

Tableau 2. Valeurs de l'irradiation pour une journée-type

Ce tableau, équivalent au suivant, discrétise la distribution en prenant comme référence les niveaux de radiation.

Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	Heure solaire (h)
1000	de 11:06 à 12:54
900	de 10:30 à 11:06 et de 12:54 à 13:30
800	de 10:00 à 10:30 et de 13:30 à 14:00
700	de 9:36 à 10:00 et de 14:00 à 14:24
600	de 9:12 à 9:36 et de 14:24 à 14:48
500	de 8:48 à 9:12 et de 14:48 à 15:12
400	de 8:24 à 8:48 et de 15:12 à 15:36
300	de 8:00 à 8:24 et de 15:36 à 16:00
200	de 7:30 à 8:00 et de 16:00 à 16:30
100	de 6:48 à 7:30 et de 16:30 à 17:12

Tableau 3. Valeurs de l'irradiation pour une journée-type

### 2.1.3.3 Dimensions-type

Les systèmes proposés dans l'offre seront dimensionnés selon des valeurs-type figurant au tableau 4 de la page suivante. Ces paramètres sont fixés en vue de permettre la comparaison des offres, mais les paramètres réels d'installation pourront différer de ces valeurs-type.

La définition des paramètres figurant au tableau 4 est la suivante. Elle se réfère à la figure 2 dans laquelle n'est pas montré, pour la clarté du dessin, le local technique :

**A** : Différence géométrique de cote entre le niveau de l'eau en pompage supposé invariable et l'orifice de sortie du tuyau de refoulement à la sortie du puits, comme défini dans la figure 2.

**B** : Différence géométrique de cote entre l'orifice de sortie de la tuyauterie du puits et le point d'entrée de l'eau dans le réservoir, comme défini dans la figure 2.

**H<sub>f</sub>** : Hauteur équivalente de friction que traduit en «hauteur en mètres vue par la pompe», les pertes par friction se produisant dans la tuyauterie. La tuyauterie doit être dimensionnée de manière que **H<sub>f</sub>** soit inférieure à 5 % de A+B.

**C** : Longueur du câble entre le convertisseur et le point d'intersection entre la verticale de la pompe et du plan horizontal du convertisseur, comme indiqué en figure 2.

**D** : Dimensions de l'enclos défini en 2.1.7.4

Il est à préciser que les paramètres A et B sont indiqués dans le tableau 4 en valeur géométrique. Il appartient donc au soumissionnaire de prendre lui-même en compte les pertes de charge dans les conduites et accessoires qu'il propose et de les optimiser pour limiter les pertes par friction à 5 % de la hauteur géométrique totale.

Chaque ensemble de paramètres (A, B, H<sub>f</sub>, C, D) définit un système de référence dont le numéro figure à la première colonne du tableau 4. Pour chacun de ces systèmes inclus dans le lot, le soumissionnaire devra remplir un exemplaire de la fiche technique visée en 2.1.8. et spécifier les prix selon le chapitre 11.2 des Instructions aux soumissionnaires.

Les pompes sont censées être installées 5 mètres sous le niveau d'eau en pompage, comme défini par le paramètre A.

Système	A (m)	B (m)	H <sub>f</sub> (m)	C (m)	D (m)
MEDA 1	32	8	2	10	12+8
MEDA 2	47	8	3	10	16+10
MEDA 3	75	8	4	10	20+12
MEDA 4	97	8	5	10	26+12

Tableau 4. Valeurs des dimensions types

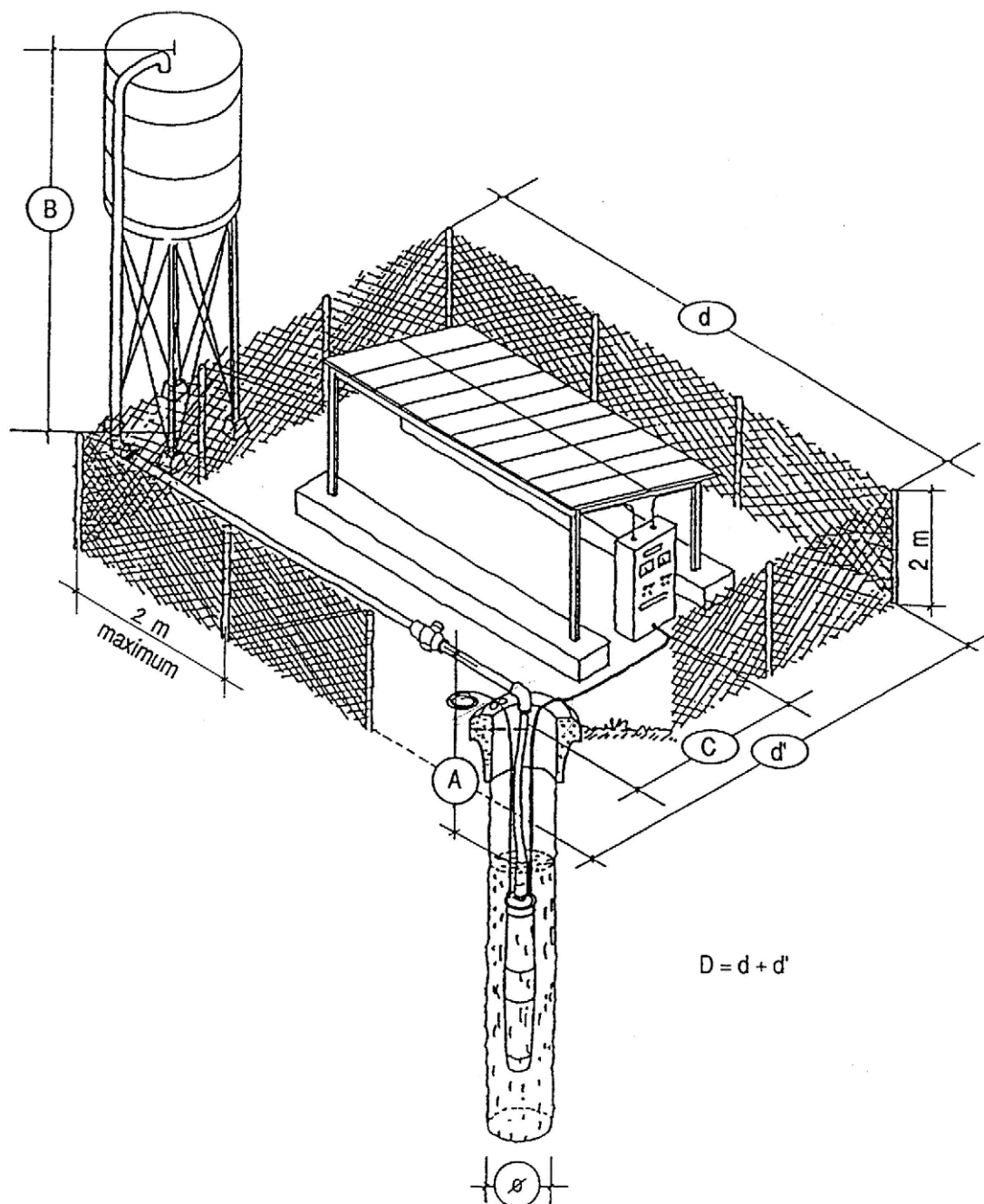


Figure 2. Système pour puits et forages. Schéma d'installation

#### 2.1.4 Générateurs photovoltaïques

Ils sont constitués des modules photovoltaïques, de diodes de dérivation si nécessaire, et des structures de support.

Le type de module proposé devra avoir subi les tests de qualification de l'IEC 61215.

Le soumissionnaire proposera la puissance nominale du générateur photovoltaïque qu'il considère nécessaire pour chaque système type. Dans tous les cas, la puissance réelle du générateur photovoltaïque devra être suffisante pour garantir le service correspondant à chaque système type, selon ce qui est indiqué au tableau 1.

Ceci implique que la valeur minimale de la puissance du générateur admise dans la limite des tolérances des modules solaires le constituant satisfasse la condition de service indiquée au tableau 1, et ce pour chaque système type.

Cette valeur minimale de l'intervalle de la puissance nominale proposée par le soumissionnaire, sera considérée comme puissance contractuelle, et sera utilisée comme référence pour la prise en compte de la garantie, selon l'article 13.1.2.

Ainsi, la puissance du générateur et le service délivré par la pompe correspondant à chaque système type, seront testés respectivement lors de la réception des systèmes (article 6 de l'annexe technique) et durant les essais de composants (article 5 de l'annexe technique).

Si le voltage à la sortie du générateur photovoltaïque est égal ou supérieur à 30 Volts, chaque module sera protégé contre le phénomène de "point chaud" par une diode de dérivation. Cette diode de dérivation devra être facilement substituable sans remplacer le module qu'elle protège. Cette diode de dérivation devra résister à une tension inverse d'au moins 1000 V.

Si la tension à la sortie du générateur photovoltaïque est égale ou supérieure à 30 Volts, la protection des personnes contre des contacts fortuits en respectant les spécifications du chapitre 2.1.7.7 de cette annexe technique.

Les structures-support permettant l'assemblage en générateur et la fixation de celui-ci seront réalisées en aluminium anodisé ou en acier galvanisé à chaud. L'ensemble fondations/structures-support devra supporter des vitesses de vent de 150 km/h.

L'ensemble des assemblages sera assuré par des liaisons en acier inoxydable ou en alliage d'aluminium anodisé. Les structures-support devront permettre l'échange d'un module individuellement. L'ensemble présentera une conductance électrique suffisante pour assurer une protection adéquate contre la foudre en respectant les spécifications de sécurité du chapitre 2.1.1.7.

Les modules seront placés à une hauteur par rapport au sol égale ou supérieure à 1 mètre. L'inclinaison des modules sera de 20° par rapport à l'horizontal et sera fixe, sans possibilité d'être modifiée par les utilisateurs.

### **2.1.5 Onduleurs et autres interfaces**

L'onduleur sera logé dans une boîte de protection répondant aux spécifications de l'indice IP 5.4 selon la norme IEC 60529 et ceci même après installation, donc après la mise en place de tous les passages de câbles. L'isolation de l'onduleur sera telle qu'elle satisfasse toutes les conditions des normes IEC 60439 et IEC 60364.

Il comprendra un interrupteur manuel de l'alimentation de la pompe.

L'onduleur disposera de protections automatiques contre les phénomènes suivants :

- Inversion de polarité à l'entrée,
- Mise à la terre et court-circuit sur le circuit de sortie,
- Blocage du moteur de la pompe,
- Fonctionnement à vide de la pompe : arrêt automatique du moteur quand la pompe tourne à vide,



- Débordement du réservoir : arrêt automatique du moteur quand le réservoir est plein.

Afin d'éviter des battements quand les arrêts sont activés (protections pour éviter le fonctionnement à vide de la pompe et le débordement du réservoir), la pompe sera mise à l'arrêt durant un intervalle de temps de 30 minutes à 2 heures.

La protection de l'onduleur contre les surtensions liées à la foudre sera assurée par un dispositif de type varistance ou équivalent entre la terre et chacun des deux pôles d'entrée. On se reportera au paragraphe 2.1.7.1 pour ce qui concerne les spécifications relatives aux prises de terre et au paragraphe 2.1.7.7. en ce qui concerne la sécurité des personnes

L'onduleur comportera des indicateurs permettant de repérer les conditions suivantes :

- Fonctionnement normal,
- Blocage du moteur de la pompe,
- Fonctionnement à vide de la pompe,
- Réservoir plein.

## **2.1.6 Pompes**

Seules les pompes immergées seront acceptées.

Les pompes, comme le reste du matériel, doivent être dûment éprouvées.

Les dispositifs prévoyant, pour certaines puissances, la superposition de deux pompes, sont acceptables, sous réserve d'être clairement explicités.

Un clapet anti-retour sera systématiquement inclus en sortie de pompe. Toutefois, d'autres types de clapet anti-retour peuvent être proposés pour approbation.

Une attention particulière sera accordée aux matériaux constitutifs des turbines, en relation avec la résistance à l'agressivité et la turbidité à l'eau.

Une attention particulière aussi sera accordée à la fiabilité de la pompe. Pour cela, il sera vérifié si le groupe motopompe est capable de supporter 10 000 cycles de démarrage - arrêts.

## **2.1.7 Accessoires complémentaires, fournitures pour installation, documentation et notices techniques**

### **2.1.7.1 Câblage électrique et prise de terre**

a) Selon les cas, les câbles électriques satisferont les conditions suivantes :

- isolés de l'intempérie par un tuyau protecteur,
- disposer d'un isolement thermodurcissable susceptible de résister à une température de service de 90° C. En particulier les isolants en PVC simple sont interdits. Dans tous les cas ils doivent être conçus pour intempéries selon la norme IEC 60811,

- être enterrés dans une tranchée de profondeur minimale 400 mm et protégés par une gaine offrant une bonne résistance mécanique reposant sur du sable.

Les sections des conducteurs seront telles que les chutes de tension n'excèdent pas les valeurs suivantes :

<b>Liaison</b>	<b>Chute de tension (%)</b>
Module – Module	1
Générateur – Onduleur	1
Onduleur – Pompe	3

b) Par ailleurs, le système de pompage comprendra une prise de terre à laquelle seront reliées la structure-support des modules et les parties actives de l'onduleur. La résistance de cette prise de terre sera inférieure à 30 Ohms.

La prise de terre sera du type "à plaques enterrées" ou du type "à pic vertical". Dans l'un ou l'autre cas, elle sera en cuivre ou en acier galvanisé.

Dans le cas où la prise de terre serait "à plaques enterrées", les plaques auront une épaisseur minimale de 2,5 mm si elles sont en acier et de 2 mm si elles sont en cuivre. La surface utile des plaques sera au moins de 0,5 m<sup>2</sup>. Elles seront enterrées en position verticale et de telle façon que la distance de leur sommet à la surface du sol soit au minimum de 200 mm.

Dans le cas où la prise de terre serait "à pic vertical", le pic pourra être constitué :

- soit par un tube d'acier de diamètre minimal 25 mm,
- soit par un profilé d'acier de 60 mm de côté au minimum,
- soit par une barre d'acier ou de cuivre de diamètre minimal 14 mm.

Dans tous les cas, les pics seront enterrés verticalement et leur longueur sera au minimum de 2 m.

c) Toutes les boîtes de connexions non enterrées seront placées à plus de 0,5 mètre au-dessus du sol. Elles seront installées de telle sorte que tous les passages de câble soient étanches.

#### **2.1.7.2 Refoulement, soutènement et alimentation électrique des pompes et moteurs et tuyauterie jusqu'au réservoir**

Les colonnes de refoulement entre la pompe et la surface seront obligatoirement constituées d'un matériau de qualité alimentaire, résistant aux eaux agressives. L'acier galvanisé et le polychlorure de vinyle sont exclus. Il revient aux soumissionnaires de proposer des diamètres optimisant le coût et les pertes de charge. La colonne sera livrée avec l'ensemble des accouplements nécessaires, constitués de matériaux non corrodables : elle comportera un dispositif permettant la fixation du câble électrique d'alimentation,

ainsi que l'appareillage destiné à assurer le soutènement de l'ensemble moteur-pompe, s'il est nécessaire.

La longueur des colonnes de refoulement sera précisée dans chaque lot.

La connexion électrique entre l'ensemble moteur-pompe et le câble de sortie de l'onduleur ou du générateur sera assurée par une boîte de liaison étanche capable de résister à une pression supérieure ou égale à 2 Bars.

La tuyauterie qui relie la sortie du puits ou du forage sera en matière inoxydable et de diamètre suffisant pour garantir que les pertes par friction soient inférieures à 5 % de la hauteur géométrique totale. L'absence d'oxydation de la tuyauterie est un élément fondamental pour éviter les fuites d'eau du système. Aussi l'absence de toute partie oxydée sera vérifiée au moment de la réception provisoire. L'existence d'oxyde dans la tuyauterie impliquera inévitablement son remplacement par l'attributaire.

### **2.1.7.3 Têtes de puits et de forages**

L'attributaire assurera l'installation sur site de l'ensemble des équipements à disposer sur les puits ou forages. Ainsi, il pourra être chargé dans certains cas du démontage de l'installation existante (pompe manuelle, Diesel, etc.).

Il est nécessaire de souligner qu'aussi bien dans le cas de puits ou de forage, devront au moins être inclus les équipements suivants :

un débitmètre,

un élément qui permette d'installer facilement un manomètre,

une sortie pour robinet qui permette de réaliser des travaux de maintenance sur le générateur,

un élément qui permet d'installer un injecteur de chlore (typiquement 1/2 pouce),

un tuyau en T pour l'installation éventuelle d'une autre pompe indépendante,

une vanne de régulation.

Tous ces éléments constituant la tête de puits (ou de forage) doivent être en matériau inoxydable.

Le compteur doit présenter une résolution de 0.1 m<sup>3</sup> et une précision de 10 %.

On peut rencontrer les cas suivants :

## **1. Forage**

L'attributaire devra prendre en charge la construction d'une tête de puits comme celle décrite dans la figure 3. Deux cas pourront se présenter :

- a) Cas général : Il existe autour du tubage du forage une margelle en béton armé exécutée dans les règles de l'art. Dans ce cas, les prestations de l'attributaire consisteront à dégager, sur une profondeur de 30 cm et une largeur de 40 cm, l'espace annulaire du forage, à procéder au scellement d'une butée en acier galvanisé et au montage de la tête de forage conformément à la figure 3.

b) Dans le cas où il n'existerait pas de margelle satisfaisante autour du forage, il reviendra à l'attributaire de construire cette margelle, qui respectera les spécifications suivantes :

- Dimensions : 100 cm x 100 cm x 35 cm,
- Béton armé dosé à 350 kg de ciment / m<sup>3</sup> de béton,
- Pente vers l'extérieur permettant l'évacuation des eaux excédentaires,
- Parafouille conforme à la figure 3.

## **2. Puits ouvert**

L'attributaire sera chargé de construire, dans le cas où elle n'existerait pas ou elle ne serait pas satisfaisante, une margelle de 1 m autour du puits pour la protection contre les chutes des personnes et autres éléments dans le puits. Cette margelle peut être perforée dans sa base pour permettre la sortie de la tuyauterie qui va du puits au réservoir

De plus, l'attributaire devra installer un couvercle sur la tête de puits avec un matériau qui permette de l'enlever et le remettre facilement (sont acceptés des matériaux comme le bois, etc.). Ce couvercle doit être pourvu d'une ouverture qui permette la lecture du débit sans nécessité d'enlever le couvercle du puits.

### **2.1.7.4. Clôtures et locaux techniques**

Toutes les clôtures seront réalisées en grillage d'acier galvanisé, de maille 60 mm, de diamètre minimum 3 mm, de hauteur 2 mètres au-dessus du sol. La forme de l'enclos pourra être rectangulaire ou carrée. Les dimensions du périmètre sont spécifiées, pour chaque système-type, et à titre indicatif et de comparaison des offres, les spécifications de l'article 2.1.3.3. Les piquets seront en acier, et ancrés sur un plot de béton armé de hauteur 400 mm, longueur et largeur 200 mm. La distance entre 2 piquets voisins ne sera pas supérieure à 2 m. L'enclos comportera un portail grillagé fermant à clé, de 1 mètre de large au moins.

Il sera positivement considéré que cet enclos soit substitué par un mur de mêmes dimensions, respectueux de l'architecture et des matériaux traditionnels locaux, sous la responsabilité et le contrôle de l'attributaire.

L'onduleur et la tête de puits seront abrités dans un local technique construit selon l'architecture et dans des matériaux locaux. Ses dimensions devront être les suivantes : 2 m de hauteur, 4 m de longueur et 3 m de largeur. Il devra disposer d'une porte fermant à clé, de deux fenêtres de 1 m<sup>2</sup> chacune avec grille et verrou, d'une trappe sur le toit de 1 m<sup>2</sup>, fermant à clé et placée à la verticale de la tête de puits.

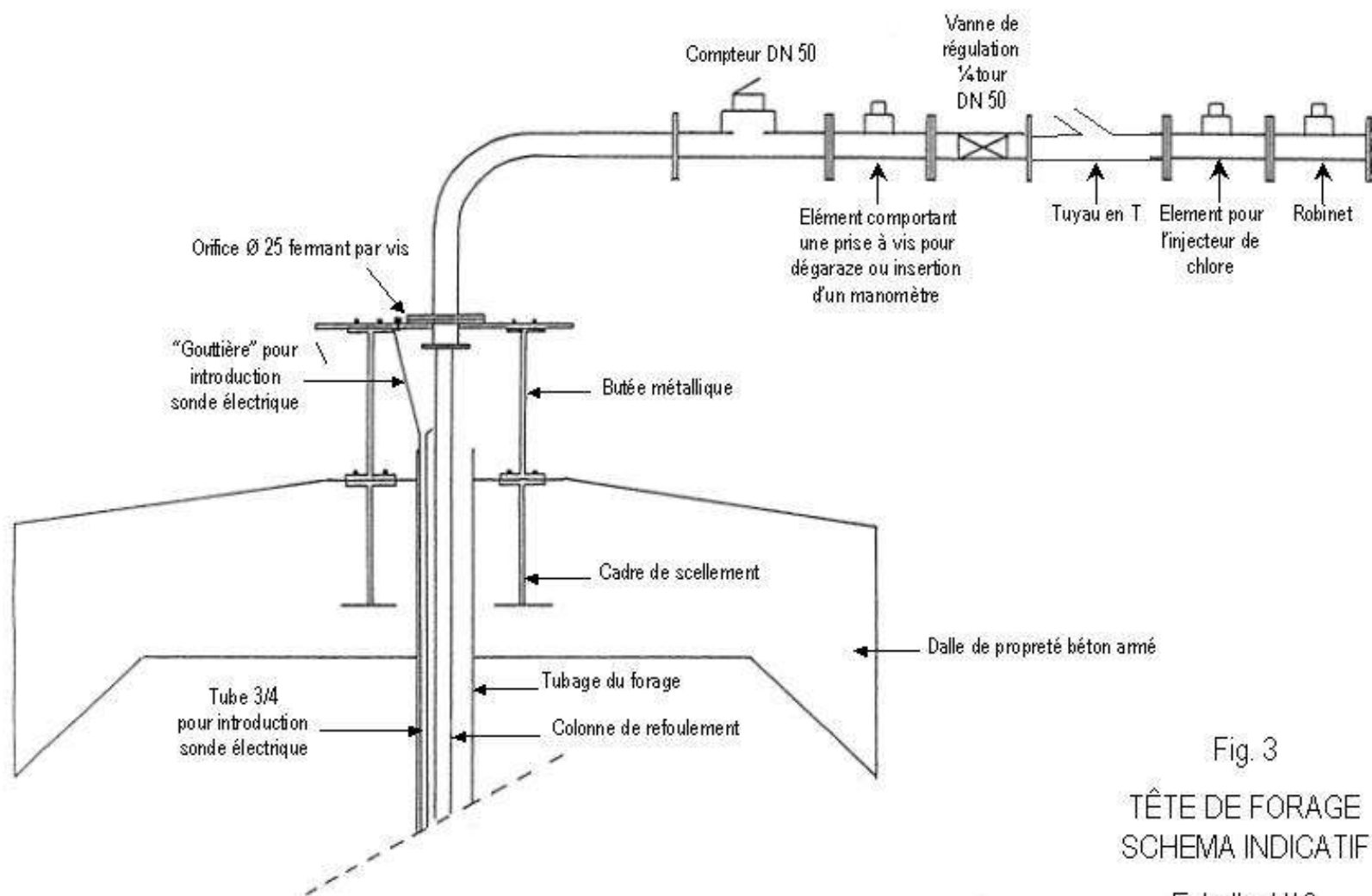


Fig. 3  
TÊTE DE FORAGE  
SCHEMA INDICATIF  
Echelle 1/10

### **2.1.7.5. Documentation et notices techniques**

#### **a) Prévention des risques d'accident**

Pour chaque système de pompage installé, l'attributaire devra livrer une affiche plastifiée comportant, sous forme de quelques dessins, une description claire des manipulations à éviter et des consignes de sécurité à observer. Ces affiches seront installées à demeure par l'attributaire lors de l'installation, dans un lieu bien visible.

#### **b) Notice destinée à l'opérateur villageois**

Pour chaque système de pompage installé, l'attributaire devra livrer une notice de quelques pages conçue essentiellement sous forme de dessins, pour permettre à l'opérateur villageois d'effectuer les opérations de mise en route et d'entretien courant qui lui incombent.

#### **c) Description technique de l'installation**

Pour chaque système de pompage installé, l'attributaire remettra en double exemplaire au représentant de la localité description technique complète de l'équipement, comportant notamment le type et les performances contractuelles de chacun des composants, ainsi que les mètres des différents types de tuyaux et câbles installés.

L'attributaire remettra au maître d'ouvrage local un dossier avec la description technique de chaque type de système installé, tel comme décrit dans le paragraphe antérieur. Si des installations ne correspondent pas aux systèmes-types, l'attributaire devra remettre au maître d'ouvrage un document technique pour chacune des dites installations.

Ces documents seront établis en langue française et en arabe.

### **2.1.7.6. Réseau de distribution**

Le soumissionnaire sera seul responsable de l'offre de tout le matériel nécessaire pour réaliser le réseau de distribution. Les travaux d'installation du réseau de distribution (réalisation de tranchées, interconnexions de la tuyauterie, ...etc.) sont à la charge et sous la responsabilité du maître d'ouvrage local.

Le matériau utilisé pour le réseau de distribution sera de qualité alimentaire.

Dans le cas où les tuyaux du réseau de distribution seraient en acier galvanisé, des précautions par rapport à la qualité de la galvanisation devront être prises. La bonne galvanisation de la tuyauterie est un élément fondamental pour éviter les fuites d'eau dans le système. Pour cela l'absence de parties oxydées au moment sera vérifiée lors des réceptions provisoire et finale. L'existence d'oxydation dans la tuyauterie impliquera nécessairement son remplacement par l'attributaire.

La tuyauterie du réseau de distribution principal sera d'au moins 2 et 1/2 pouces et de 1 pouce pour le secondaire.

Pour les systèmes qui comportent une distribution jusqu'aux maisons, il y a lieu de fournir un débitmètre par maison, de débit nominal de 1,5 m<sup>3</sup>/h.

Pour les systèmes qui comportent des bornes fontaines, il y a lieu de fournir un débitmètre (de débit nominal de 3 m<sup>3</sup>/h) et quatre vannes pour chaque borne fontaine.

#### **2.1.7.7 Sécurité des personnes**

Dans le but d'assurer la sécurité des personnes, les mesures suivantes devront être prises :

- Mise à la terre, selon ce qui est décrit dans la section 2.1.7.1, des structures-supports du générateur et des cadres des modules photovoltaïques,
- Une protection classe II selon la norme IEC 60364. Il faut noter que la réalisation de la partie continue de l'installation en flottant, c'est-à-dire sans connecter ni le pôle positif ni le pôle négatif à la terre, et l'installation d'un mesureur d'isolement permettant de vérifier qu'il n'y ait aucune dérivation à la terre du système, seront appréciées favorablement. De même, il sera préférable que l'onduleur ait un système de contrôle de l'isolement. Si tel n'est pas le cas, il y aura lieu d'inclure dans les visites routinières du technicien, et entrant dans le cadre du contrat de maintenance, une mesure de l'isolement qui doit toujours être inférieur à 20 mA. La partie courant alternatif de l'installation devra disposer de détection et protection contre les dérivations à la terre.
- Fixation de pancartes de danger et d'électrocution sur les portes d'accès de l'enclos et du local technique.
- Réalisation de toutes les connexions électriques dans des boîtes de connexion hermétiques.
- D'autres alternatives de sécurité incluses dans la norme IEC 60364 pourront être valorisées.

#### **2.1.8 Fiches techniques**

Le soumissionnaire devra impérativement joindre à son offre la fiche technique ci-après, dûment remplie, pour chacun des systèmes type définis aux tableaux 1 et 4, inclus dans le(s) lot(s) pour lequel ou lesquels il concourt.

Il devra fournir, en annexe à cette fiche, les documents suivants :

**Annexe A** : Copie du certificat des tests de qualification de chacun des types de modules photovoltaïques proposés.

**Annexe B** : Courbe Tension – Courant (I/V) pour chacun des types de modules proposés, aux conditions standards suivantes : Intensité du rayonnement = 1000 W/m<sup>2</sup>, Température de cellule = 25° C. Une liste d'au moins 10 valeurs Tension-Courant doit être ajoutée de 0 à Voc (tension en circuit ouvert) et inclura les points Isc, Voc, I<sub>M</sub> et V<sub>M</sub>.

**Annexe C** : Schéma descriptif de la structure-support des modules et des fondations.

**Annexe D** : Description de la procédure pour dimensionner les systèmes.

**Annexe E** : Plans détaillés de câblage, incluant les boîtes de connexion.

**Annexe F** : Liste des accessoires.

**Annexe G** : Références : liste des équipements semblables installés, avec date et lieu d'installation, maître d'ouvrage et financement.



## FICHE TECHNIQUE SYSTEMES DE POMPAGE

### SYSTEME (MEDA 1 à MEDA 4)

#### A. GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

##### A.1 Données générales

$P_{M,g}^*$  Puissance nominale du générateur (1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C)

W<sub>c</sub>

Tension nominale

V

Nombre de modules en série

Nombre de modules en parallèle

##### A.2 Modules

Dénomination

Nombre de cellules en série

Nombre de cellules en parallèle

$P_M^*$ , Puissance nominale (aux conditions standard)

W<sub>c</sub>

$V_{oc}^*$ , Tension de circuit ouvert (aux conditions standard)

V

$I_{sc}^*$ , Courant de court circuit (aux conditions standard)

A

$V_M^*$ , Tension la puissance maximale (aux conditions standard)

V

$I_M^*$ , Intensité de courant à la puissance maximale (aux conditions standard)

A

NOCT (Température nominale d'opération des cellules)

°C

Longueur

Largeur cm

cm  
Laboratoire de certification (Fournir le certificat de test et la courbe I-V en annexes A et B)

### A.3 Diodes de dérivation (si $V_{oc} > 30\text{ V}$ )

Dénomination

Courant maximum admissible

A  
Tension inverse maximum

V

### A.4 Structure- support

Dénomination

Matériau constitutif

(Fournir le schéma de montage en annexe C)

## B. ONDULEUR OU AUTRE INTERFACE

Dénomination

Plage de température d'utilisation

de ....°C à .... °C  
Puissance nominale

..... W  
Plage de tension à l'entrée

de ..... V à ..... V

Plage de tension à la sortie  
de ..... V à ..... V

Plage d'intensité à l'entrée

de ..... A à ..... A

Plage d'intensité à la sortie

de ..... A à ..... A

Plage de fréquence à la sortie

de ..... Hz à ..... Hz

Mode de démarrage (existence de temporisation, ...)

Caractéristiques du suivi du point de puissance maximum (tension, suivi avec ou sans compensation de température)

-Protections automatiques: *porter OUI si la protection existe et NON dans le cas contraire:*

- Inversion de polarité : OUI / NON
- Court-circuit : OUI / NON
- Moteur bloqué : OUI / NON
- Fonctionnement à vide OUI / NON
- Réservoir plein : OUI / NON
- Autres protections éventuellement disponibles (spécifier)

## C. MOTEUR

Dénomination

Puissance mécanique nominale

W

Tension nominale

V

Vitesse nominale

t/m

Plage de tension

de ..... V à ..... V

Plage de vitesse

de ..... t/m à .....t/m

Fluide de refroidissement

#### **D. POMPE**

- Dénomination
- Principe (centrifuge, etc. )
- Diamètre extérieur
- Nombre d'étages
- Tolérance au sable
- Matériaux constitutifs
- Courbe débit/hauteur de la pompe (liste de 7 valeurs au moins de cette courbe Q-h)

#### **E. ENSEMBLE MOTEUR POMPE**

- Fréquences de maintenance :

- Fréquence de graissage
- Autres

#### **F. CABLE ET PRISES DE TERRE**

F.1 Câbles : Remplir le tableau suivant :

CONNEXION ENTRE					
	Module Module	Générateur Onduleur	Onduleur Pompe	Structure Terre	Onduleur Terre
Dénomination					
Matériau isolant					

Section du conducteur					
Tuyau protecteur*					
Passage souterrain*					

\* Remplir par OUI ou NON

## F.2 Prises de terre

- Dénomination
- Type (plaques, pic)
- Matériau
- Dimensions

(Fournir les annexes E et F)

## G. CONDUITES ET ACCESSOIRES

### G.1 Tuyau du puits

- Matériau constitutif
- Diamètres :
  - Extérieur
  - Intérieur

### G.2 Tuyau de la tête de puits

- Compteur
  - Précision
  - Dénomination
  - Principe de fonctionnement

Tuyau : Matériau constitutif

### G.3 Tuyau jusqu'au réservoir

- Matériau constitutif
- Diamètres :
  - Extérieur
  - Intérieur
- Éléments pour la protection contre le remplissage
  - Matériau constitutif
  - Caractéristiques

### G.4 Total des pertes de charge en conduites

..... m d'eau au débit de.....m<sup>3</sup>/h

#### G.5 Autres accessoires

- Sonde de niveau
- Manomètre
- Autres

#### G.6 Conduites de distribution

- Matériau constitutif
- Diamètres :
  - Extérieur
  - Intérieur
- Type de compteur dans les points de distribution
  - Précision
  - Dénomination
  - Principe de fonctionnement

## 2.2 SYSTEME DE POTABILISATION

Le système de potabilisation de l'eau est composé de :

Sous-système	Description
Pompe d'injection	Pompe de dosage munie d'un contrôle de la fréquence d'injection, avec la capacité d'injecter la dose adéquate de chlore pour un débit maximum de pompage.
Contrôle	Sonde de débit d'eau pompée qui transmet un signal de contrôle à la pompe d'injection et qui régule le débit de chlore pour potabiliser l'eau.
Interface	Injecteur sur la tuyauterie qui relie la tête de puits au réservoir.
Accumulation	Réservoir pour stocker l'hypochlorite de sodium.
Alimentation électrique	Système d'alimentation électrique (qui pourrait faire partie du même générateur photovoltaïque qui alimente le pompage). Dans tous les cas il sera alimenté à partir d'une source photovoltaïque.

Les critères et spécifications exigés pour les équipements de potabilisation sont :

### 2.2.1 Fiabilité

#### a) Pompe d'injection

- La pompe d'injection doit être d'un indice de protection IP 54,
- La pompe d'injection doit permettre le passage de l'hypochlorite de sodium sans pour autant être endommagée,
- La relation entre la fréquence d'injection de la pompe du chlore et la signal du détecteur de la quantité d'eau pompée doit être linéaire dans tout l'intervalle de débit permis pour la pompe d'eau.
- La pompe d'injection doit être munie d'un détecteur de réservoir de chlore vide,
- La pompe d'injection doit être apte à fonctionner dans une plage de tension d'alimentation sans changer la linéarité de la fréquence d'injection.

#### b) Détecteur de la quantité d'eau pompée

- Le détecteur (par exemple un débitmètre avec signal de sortie de 4 à 20 mA) doit être apte à estimer le débit de l'eau pompée avec une erreur de  $\pm 5\%$ ,
- Le détecteur doit être apte à fonctionner dans une plage de tension d'alimentation sans changer la linéarité de sa fonction de transfert,
- Le détecteur doit être au moins muni de la protection IP 54.

#### c) Réservoir de chlore



- Le réservoir doit être fabriqué avec un matériel tel qu'il permette de visualiser la quantité d'hypochlorite de sodium restant à l'intérieur,
- Le couvercle de fermeture du réservoir doit être bien ajusté de manière à minimiser l'évaporation de l'hypochlorite de sodium, laissant seulement un petit orifice ( $\sim 1\text{mm}^2$ ) pour permettre l'aspiration.
- Le réservoir de chlore ne devrait pas être placé au-dessous de la pompe d'injection pour éviter qu'une évaporation possible puisse l'endommager.

#### d) Sécurité

Par rapport à la sécurité des usagers, cet équipement a l'inconvénient de contenir de l'hypochlorite de sodium stocké dans son réservoir, pour cela il est extrêmement nécessaire de prendre toutes les précautions afin éviter tout accident. Ainsi, il y a lieu de recommander les spécifications suivantes :

- La pompe d'injection doit être munie d'un fusible de protection à l'entrée,
- La pompe d'injection doit être munie d'un interrupteur d'arrêt,
- Le réservoir de stockage de l'hypochlorite de sodium doit être étiqueté avec la mention « Danger, liquide toxique »,
- Le local abritant l'équipement de chloration doit être pourvu d'un robinet d'eau qui permette de se laver en cas de contact avec l'hypochlorite de sodium.

#### e) Dimensionnement

La taille des divers composants doit permettre de disposer d'une quantité de chlore à injecter en relation avec le volume d'eau pompée. Pour cela :

- Il faut sélectionner un détecteur avec une échelle telle qu'il permette de mesurer avec la précision suffisante le débit de l'eau pompée par la pompe,
- La pompe d'injection doit avoir une capacité d'injection de 100 % supérieure au maximum prévu en circonstances normales et à la pression existante au point d'injection,
- La quantité de chlore à injecter sera celle indiquée par la législation en vigueur dans chaque pays.

#### **2.2.4 Facilités d'utilisation**

- Le fonctionnement correct de la pompe à injection devra être signalé par une lumière verte. Dans le cas contraire il doit être rouge.
- L'épuisement de l'hypochlorite de sodium dans le réservoir doit être signalé avec une lumière rouge spécifique.

#### **2.2.5 Maintenance**

Les tâches de maintenance routinières que requiert un système de purification au chlore sont : le remplissage de l'hypochlorite de sodium dans le réservoir, le nettoyage du filtre

de la pompe d'injection, et le possible remplacement de fusibles. Afin de faciliter ces tâches, il y a lieu de recommander les critères suivants :

- L'équipement doit être fourni avec fusibles et filtres de rechange, et les deux doivent être faciles d'acquisition dans le marché,
- Les composés de chlore qui requièrent une manipulation excessive pour le remplissage du réservoir sont à éviter. Aussi, l'usage d'eau de Javel commerciale sera recommandé.

La fourniture de l'hypochlorite de sodium ne fait pas partie des composants et pièces de rechange inclus dans les contrats de maintenance. Pour cela, sa fourniture est sous la responsabilité du maître d'ouvrage local ou de celui qu'il délègue. Toutefois, il sera valorisé positivement que les tâches relatives au contrôle du niveau du chlore dans le réservoir et son remplissage, soient incluses dans les tâches routinières aux cours des visites périodiques que comporte chaque contrat de maintenance.

La fourniture et le remplacement des kits « tests des couleurs » pour mesurer la concentration du chlore dans l'eau, sont considérés comme faisant partie des prestations incombant à l'attributaire (se référer à l'article 11.2 des instructions aux soumissionnaires).

Chaque système de potabilisation devra être accompagné de la documentation suivante :

a) Prévention des risques d'accident

Pour chaque système de potabilisation installé, l'attributaire devra livrer une affiche plastifiée comportant, sous forme de quelques dessins, une description claire des manipulations à éviter et des consignes de sécurité à observer. Ces affiches seront installées à demeure par l'attributaire lors de l'installation, dans un lieu bien visible.

b) Notice destinée à l'opérateur villageois

Pour chaque système de potabilisation installé, l'attributaire devra livrer une notice de quelques pages conçue essentiellement sous forme de dessins, pour permettre à l'opérateur villageois d'effectuer les opérations de mise en route et d'entretien courant qui lui incombent.

c) Description technique de l'installation

Pour chaque système de potabilisation installé, l'attributaire remettra, en double exemplaire, au représentant de la localité, la description technique complète de l'équipement.

L'attributaire remettra au maître d'ouvrage local un dossier avec la description technique de chaque type de système installé, comme décrit dans le paragraphe antérieur.

Ces documents seront établis en langue française et en arabe.

## **2.2.6 Fiche technique**

Les soumissionnaires doivent obligatoirement joindre à leur offre la fiche technique suivante, dûment remplie, pour le système de potabilisation qu'ils proposent.

## FICHE TECHNIQUE DES SYSTEMES DE POTABILISATION

### A. SYSTEME D'ALIMENTATION

Spécifier la méthode d'alimentation électrique sélectionnée

- Commun au système de pompage de l'eau (barrer la mention inutile) OUI/NON
- Tension nominale

V

Si la méthode d'alimentation n'est pas commune à la pompe d'exhaure de l'eau, spécifier les caractéristiques du module et du générateur conformément à la fiche spécifique aux systèmes de pompage.

### B. POMPE D'INJECTION

- Dénomination
- Intervalle de tensions d'utilisation

de .....V à .....V

- Capacité d'injection

litres/heure

- Signaux visuels indiqués
- Type de fusible à l'entrée
- Type de tube d'aspiration
- Type de tube d'injection
- Diamètre de l'injecteur dans la tuyauterie du puits au réservoir

### C. DÉTECTEURS DE CONTROLE

- Dénomination
- Intervalle de tensions utilisées

de .....V à .....V

- Précision
- Principe de fonctionnement

#### **D. RESERVOIR DE CHLORE**

- Type
- Capacité

## **ARTICLE 3 : PRESTATIONS DE SERVICE**

### **3.1 SERVICE APRES-VENTE**

Le service après-vente est un élément fondamental d'appréciation des offres. Les offres non conformes aux prescriptions suivantes seront rejetées, quel que soit le jugement porté par ailleurs sur la qualité et le prix des fournitures offertes.

#### **3.1.1 Représentation locale de l'Attributaire**

Les soumissionnaires doivent impérativement préciser dans leur offre le nom et les références d'une société qui assure leur représentation dans l'Etat (ou les Etats) pour le (s) lot(s) pour lequel (ou lesquels) ils soumissionnent, et qui y effectue le service après-vente sous la responsabilité de l'Attributaire. Il doit s'agir d'une société stable de droit local.

Ce représentant doit être à même de fournir les pièces de rechange, et d'assurer la garantie et la maintenance.

L'offre doit indiquer :

- La raison sociale, date de création, capital social, ainsi que la localisation des établissements de ladite société,
- Les références de cette société dans l'exécution de tâches semblables à celles objet du présent appel,
- La nature des accords commerciaux entre le soumissionnaire et son représentant local.

#### **3.1.2 Garantie**

La période de garantie contre les défauts de matière, de fabrication ou de montage est au minimum :

- de 10 ans pour tous les générateurs photovoltaïques,
- de 2 ans pour tous les autres composants.

La garantie couvre également la baisse éventuelle de performance des générateurs, durant cette période de 10 ans, au-delà de 10 % de la puissance-crête contractuelle.

Pour circonscrire leur responsabilité, les soumissionnaires indiqueront précisément les limites des garanties offertes.

#### **3.1.3 Maintenance des installations**

Les tâches de maintenance se verront facilitées par le suivi des installations. Dans le but de concrétiser ce suivi il sera installé un débitmètre à la sortie de la pompe, et des débitmètres en chaque point de distribution aux utilisateurs.

Le soumissionnaire d'un lot de systèmes devra fournir aussi un lot de composants et de pièces de rechange, comme indiqué à l'article XXXIII des prescriptions particulières. La valeur de ce lot de pièces de rechange ne pourra excéder 5 % du prix de systèmes. Ce

stock de pièces de rechange sera placé sous la responsabilité du maître d'ouvrage de chaque lot ou de celui qu'il délègue.

En plus, le soumissionnaire devra garantir au maître d'ouvrage ou à celui qu'il délègue, la fourniture de pièces de rechange durant une période minimale de 5 années.

Le remplacement des pièces est gratuit pendant la période de garantie de chacun des constituants. Les pièces fournies au titre du stock initial défini à l'article XXXIII des prescriptions particulières, et qui seraient utilisées en remplacement des pièces encore sous garantie, seront renouvelées gratuitement à l'occasion de la livraison suivante.

Au-delà de la période de garantie, la fourniture des pièces est rémunérée sur les bases du barème de vente défini à l'article 11.2 des instructions aux soumissionnaires.

L'attributaire devra signer un contrat de maintenance avec le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue. Ce contrat de maintenance peut répondre aux 3 modalités suivantes :

***a) Contrat de maintenance « Garantie de service »***

Cette modalité inclut les obligations de maintenance, main d'œuvre, réparation et remplacement de pièces et de composants de rechange pour une durée de 5 ans.

Dans ce cas, l'attributaire assurera à travers un représentant local sous sa responsabilité, l'ensemble des opérations de maintenance, de réparation et de remplacement dans le but de garantir le service de manière constante tout au long des 5 années minimum.

Pour les installations de pompage, les prestations de service initiales doivent être maintenues dans une limite de tolérance de 10 % sur le débit.

L'attributaire devra spécifier dans son offre la fréquence des visites à chaque installation, les services inclus et aussi ceux exclus. Dans tous les cas les offres doivent inclure :

- Le remplacement sur site des constituants et pièces couverts par la garantie,
- La fourniture et le remplacement sur site des pièces au-delà de leur période de garantie,
- Le remplacement des pièces d'usure,
- Toutes les visites périodiques que l'attributaire jugerait bon d'effectuer,
- Tous les frais commerciaux,
- Les opérations de recouvrement des paiements relatifs aux contrats de service après-vente.

La rémunération de ce service après-vente s'effectuera trimestriellement ou annuellement à travers des paiements libérés par le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue, et le montant devra être spécifié annuellement et trimestriellement dans l'offre du soumissionnaire selon l'article 11.2 des « Instructions aux soumissionnaires ».

Pour faciliter la comparaison des offres, le total annuel correspondant à la maintenance se décomposera comme suit :

1. Consommation moyenne prévisible des pièces et composants de rechange durant les 5 premières années, exprimée en Euros et majorée par les coûts de commercialisation,
2. Coût du service de maintenance (déplacements, main d'œuvre, etc.),
3. Coût du service de perception des redevances.

L'Attributaire qui assumera l'entière responsabilité de son réseau devra être en mesure de remettre en fonctionnement les équipements dans un délai de 48 heures après avoir été informé par les usagers. Le respect de ce délai est attesté par des carnets à souche, indiquant la date et l'heure auxquelles l'attributaire a été avisé et celles correspondantes à la remise en marche du système. Une pénalité de 5% du montant annuel est applicable par journée de retard.

Les redevances semestrielles ou annuelles sont payables d'avance. La première est réglée lors de la réception provisoire, à la signature du contrat de maintenance.

Le contrat est suspendu de plein droit si le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue ne paye pas une échéance dans les soixante jours qui suivent la remise d'une facture.

L'Attributaire en avertit alors le maître d'ouvrage. Si le règlement n'intervient pas dans un nouveau délai de soixante jours, le contrat de service après-vente est annulé.

L'Attributaire est relevé de son obligation dans le cas où des dommages seraient dus à un mauvais usage attesté des équipements, à l'intervention d'un tiers non-habilité, à des risques naturels (exceptée la foudre) ou à des faits de guerre, émeute ou vandalisme.

#### ***b) Contrats de maintenance « Réparation d'avaries »***

Cette modalité inclut les obligations d'une visite annuelle d'inspection sur chaque installation et la réparation en cas d'avarie. La durée de ce contrat de maintenance est de 5 ans.

Dans ce cas, l'Attributaire assure, ou fait assurer par un partenaire local placé sous sa responsabilité, une visite annuelle et la réponse en cas d'avis d'avarie pour la réparation et la remise en état des installations.

L'Attributaire qui assumera l'entière responsabilité de son réseau devrait être en mesure de remettre en fonctionnement les équipements dans un délai de 48 heures après avoir été informé par les usagers.

Le service de réparation des avaries inclura ce qui suit :

- Le remplacement sur site des constituants et pièces couverts par la garantie,
- La fourniture et le remplacement sur site des pièces au-delà de leur période de garantie,
- Le remplacement des pièces d'usure,
- La visite annuelle,

- Tous les frais commerciaux.

La rémunération de ce service après-vente sera réalisé, après chaque visite annuelle ou après chaque réparation d'avarie, par le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue et ce montant devra être spécifié par le soumissionnaire dans son offre selon l'article 11.2 des « Instructions aux soumissionnaires », selon les items suivants :

- Liste des prix unitaires de composants et pièces de rechange, couvrant la totalité des éléments qui peuvent être susceptibles d'être importés pour assurer une maintenance des installations durant une période de 5 ans. Cette liste inclura les pièces et consommables qui ne sont pas couverts par la garantie proprement dite, mais qui nécessiteraient une grande fréquence de remplacement selon ce qui est spécifié dans l'article 11.2 des instructions aux soumissionnaires.
- Le prix de la main d'œuvre et les déplacements pour le remplacement de pièces et composants que le soumissionnaire spécifie dans son offre.

Le contrat est suspendu de plein droit si le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue ne paye pas une échéance dans les soixante jours qui suivent la remise d'une facture.

L'Attributaire en avertit alors le maître d'ouvrage local. Si le règlement n'intervient pas dans un nouveau délai de soixante jours, le contrat de maintenance est annulé.

#### ***c) Autres modalités de contrat de maintenance proposées par le soumissionnaire***

Pour qu'elles soient considérées valides, les propositions du soumissionnaire doivent spécifier dans l'offre les obligations qu'ils s'engagent à assurer et qui doivent inclure les services de maintenance, les modalités de paiements et le coût annuel et trimestriel.

Dans les trois cas il est utile de rappeler que le contrat de maintenance se fera avec le maître d'ouvrage ou celui qu'il délègue.

Les prestations relatives à ces contrats relèvent du droit et de la fiscalité nationale. Elles sont soumises aux taxes, droits et impôts en vigueur dans chacun des Etats. Hormis le stock initial de pièces importées au titre de l'article XXXIII.1 des prescriptions particulières, les constituants et pièces de rechange importés sont soumis aux droits et taxes de douane.

Il est à rappeler que, conformément à l'article 11.2 des instructions aux soumissionnaires, la fourniture de composants ou pièces de rechange en substitution à des pièces détériorées couvertes par la période de garantie est incluse dans le prix total de fournitures et installation des systèmes.



## **ARTICLE 4 DESCRIPTION DES LOTS**

### **4.1 LOT N° 1 : Le lot n°1 correspond au Maroc**

Maître d'ouvrage : Le maître d'ouvrage est l'association Tichka de Ouarzazate.

Association Tichka  
9<sup>a</sup>, Avenue Mohammed VI  
Quartier El Bahja  
Ouarzazate, Maroc

#### Localisation des installations

Tous les équipements à installer dans le cadre de cet appel d'offres seront destinés au milieu rural des provinces de Ouarzazate et Zagora, comme mentionné à titre indicatif et de manière provisoire dans la section 4.4.

La quasi-totalité des équipements est destinée à des systèmes de pompage sur puits, avec distribution d'eau jusqu'aux maisons. Les données relatives aux caractéristiques de ces puits selon les mesures de débits réalisées dans les règles de l'art sont disponibles. Il sera également réalisé un système destiné à l'irrigation (un système de pompage sur puits mais sans distribution d'eau jusqu'aux maisons). Ces informations sont résumées à titre indicatif et de manière provisoire en section 4.4.

### **4.2 LOT N° 2 : Le lot n°2 correspond à l'Algérie**

Maître d'ouvrage : Le maître d'ouvrage est le CDER dont le siège est à Alger.

Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)  
BP 62 Route de l'observatoire - Bouzaréah  
Alger (16340) - Algérie

#### Localisation des installations

Tous les équipements à installer dans le cadre de cet appel d'offres seront destinés au milieu rural de la wilaya d'Adrar comme mentionné à titre indicatif et de manière provisoire dans la section 4.4.

La quasi-totalité des équipements est destinée à des systèmes de pompage sur puits avec distribution à travers la foggara. Les données relatives aux caractéristiques de ces puits selon les mesures de débit réalisées dans les règles de l'art sont disponibles. Ces informations sont résumées à titre indicatif et de manière provisoire en section 4.4.

### 4.3 LOT N° 3 : Le lot n°3 correspond à la Tunisie

Maître d'ouvrage : Le maître d'ouvrage est l'ANER dont le siège est à Tunis

Agence Nationale des Energies Renouvelables  
3, Rue 8000 Montplaisir  
Tunis B.P 213 - Tunisie

#### Localisation des installations

Tous les équipements à installer dans le cadre de cet appel d'offres seront destinés au milieu rural des zones de Médenine, Tataouine et Kébili, comme mentionné à titre indicatif et de manière provisoire dans la section 4.4.

La quasi-totalité des équipements est destinée à des systèmes de pompage sur puits et forages avec distribution d'eau jusqu'aux maisons. Les données relatives aux caractéristiques de ces puits/forages selon les mesures de débits réalisées dans les règles de l'art sont disponibles. Ces informations sont résumées à titre indicatif et de manière provisoire en section 4.4.

### 4.4. LISTE PROVISoire DES SITES

La liste suivante contient une proposition de villages, non définitive, pour permettre au soumissionnaire d'avoir une idée sur les sites. De ce fait, la liste contient plus de villages qu'il n'y aura d'installations, de manière à pouvoir faire une sélection à partir de cette même liste.

Les caractéristiques des puits concernés par cette liste peuvent avoir varié, néanmoins ils demeurent une référence utile pour la préparation des offres. Dans ce but, il a été ajouté une colonne qui permet de classer les villages et les systèmes correspondant pour pouvoir comparer les offres selon l'article 2 de l'annexe technique.

La liste des villages pour le Maroc est la suivante :

Localité	Débit (m³/jour)	HMT (m)	m⁴/jour	Système type
Ighelss	42,5	60,0	2550	MEDA_3
Tamayouste	17,5	44,0	770	MEDA_1
Taoura	20	82,0	1640	MEDA_2
Anski	15	38,0	570	MEDA_1
Taurirte	43	43,0	1849	MEDA_3
Anissi	30	50,0	1500	MEDA_2
Tazoulte	30	68,0	2040	MEDA_3
Sefkoumte	35	41,5	1452,5	MEDA_2
Issil	20	34,0	680	MEDA_1

Tazelmimte	27,5	36,0	990	MEDA_2
Lamdinte+Taourirte	22,5	42,0	945	MEDA_2
Tiwiyne	17,5	47,5	831,2	MEDA_1
Imdghar Tahtani	25	60,0	1500	MEDA_2
Imdghar lfoukani	27,5	80,0	2200	MEDA_3
Boughrar	42,5	46,0	1955	MEDA_3
Assersa	75	100,0	7500	
Tislite n'ait douchen	70	68,0	4760	MEDA_4
Tamjarchte	25	86,0	2150	MEDA_3
Amassine n'Ait Ougherda	15	80,0	1200	MEDA_2
Nkob	33,5	60,0	2010	MEDA_3
Moudate	22,5	62,0	1395	MEDA_2
Imghlay	60		0	MEDA_1
Asseghmou	125	130,0	16250	
Tizilite	17,5	70,0	1225	MEDA_2
Taoulaoualte	15	98,0	1470	MEDA_2
Ikfrane	47,5	95,0	4512,5	MEDA_4
Iminsite	17,5	96,0	1680	MEDA_2
Ouaourirte	12,5	115,0	1437,5	MEDA_2
Takouchtamte	15	109,0	1635	MEDA_2
Site	55	80,0	4400	MEDA_4

Toutes les localités sont concentrées dans les provinces de Ouarzazate et de Zagora.

La liste des villages pour l'Algérie est la suivante :

Localité	Débit (m³/jour)	HMT (m)	m³/jour	Système type
Balhadj et Toukki	50	20,7	1035	MEDA_2
Ouled Sidi-Ouali Soughra	5	18,9	94,5	MEDA_1
Sidi-Youcef 1				
Armoule et Baghdad	15	20,1	301,5	MEDA_1
Noumenas	15	10,5	157,5	MEDA_1
Tatou-ouamar				
Toukki	15	15,9	238,5	MEDA_1
El-Mansour	15	18,6	279	MEDA_1
Ben-Aini				
Sidi-Youcef 2	15	23,9	358,5	MEDA_1
Berriane				
Tamentit	15	19,0	285	MEDA_1
Malha et Sebkha				
Tamentit	15	14,5	217,5	MEDA_1
Marmoure				
Noumenas	15	18,5	277,5	MEDA_1
Noumenas				
Tasfaout	15	17,8	267	MEDA_1
Yeddou				
Zaouiat Sidi-Abdelkader	15	26,5	397,5	MEDA_3b
Amazar				
Noumenas	15	15	225	MEDA_2b
Ouled Athlmane				

Boufadi	15	21	315	MEDA_3b
---------	----	----	-----	---------

Toutes les localités sont concentrées autour de la ville d'Adrar.

La liste des villages pour la Tunisie est la suivante:

Localité	Débit (m <sup>3</sup> /jour)	HMT (m)	m <sup>4</sup> /jour	Système type
Garaet Ez-Zebes	50	60	3000	MEDA_4
Bel khecheb	40	115	4600	MEDA_4
Oued Seder	20	167	3340	MEDA_4
Glib Jabna	20	265	5300	MEDA_4
Garaet El Halleb	10	79	790	MEDA_1
Ghot Lahsane	10	25	250	MEDA_1
Hassi Chejra	10	25	250	MEDA_1
EL Angoud	30	85	2550	MEDA_3
Mijna	20	50	1000	MEDA_2
Khaoui			1000	
Tegouft	20	50	1000	MEDA_2
Touama	20	60	1200	MEDA_2
Daghzen	10	25	250	MEDA_1
Ben Issa	82	30	2460	MEDA_3
Fhidia	50	12	600	MEDA_1
Sidi Marzoug	20	20	400	MEDA_1
El Henchir	50	28	1400	MEDA_2

Toutes les localités sont concentrées dans les zones de Médenine, Tataouine et Kébili.

## **ARTICLE 5 : ESSAIS, CONTROLE ET FONCTIONNEMENT**

Dans cet article sont décrits les essais et/ou contrôles qui se feront sur les systèmes dans leur ensemble ou sur leurs composants après l'attribution provisoire. L'objectif principal des essais est de vérifier la fiabilité et le fonctionnement correct de chaque partie du système. Si le résultat des essais permet de constater que les équipements ne satisfont pas aux spécifications techniques de la proposition, l'UPM-IES pourra revoir la décision d'attribution des offres. Si les carences ne sont pas graves, il sera donné une opportunité au soumissionnaire de les corriger dans un délai d'un mois. Si dans ce délai, les problèmes techniques ne sont pas résolus, l'attribution provisoire sera annulée.

Les systèmes fonctionneront dans des conditions difficiles et dans des sites isolés, imposant des conditions de transport risquées. Une grande fiabilité de chaque partie du système permettra de réduire les prestations d'entretien et de maintenance.

### **5.1 ESSAIS DE SYSTEMES**

Suite à l'attribution provisoire et avant l'attribution définitive, un système-type complet MEDA-2, sera soumis à des essais et contrôlé par l'Institut d'Energie Solaire (UPM). Ce système sera monté par l'attributaire dans ses propres installations. Le système monté sera donc sans connexion au puits ni fixé aux supports en béton du générateur photovoltaïque (l'attributaire décidera du type de support utilisé). Les coûts de ce montage seront à la charge de l'attributaire.

Des essais nécessaires pour tester les aspects suivants du système seront réalisés :

- Fiabilité
- Fonctionnalité
- Capacité de pompage
- Adaptation aux conditions rurales et désertiques

### **5.2 ESSAIS DE COMPOSANTS**

Dès l'attribution provisoire, l'attributaire devra envoyer à la direction de l'UPM/IES un ensemble onduleur-motopompe de chaque système type standardisé (Tableau 1), pour les soumettre aux essais techniques. Les caractéristiques minimales exigées dans l'article 2 de cette annexe technique seront testées. Il sera accordé une attention spéciale à la fiabilité des composants et à la satisfaction des conditions de service spécifiées dans le tableau 1.

Pour ce qui est de la fiabilité, il sera accordé une attention particulière à la robustesse de la pompe. Elle devra dépasser 10 000 cycles arrêts-démarrage auxquels elle sera soumise avec une colonne d'eau comme charge.

Pour ce qui concerne les essais liés à la satisfaction du service fourni par l'ensemble onduleur motopompe, conformément au tableau 1, ils seront réalisés en prenant comme référence la puissance contractuelle, comme indiqué à l'article 2.1.4.

D'un autre coté et suite à l'attribution provisoire, l'attributaire devra livrer à l'adresse de l'UPM/IES, 4 modules photovoltaïques. L'UPM/IES calibrera ces modules et renverra un module à l'attributaire tout en lui communiquant les valeurs de calibration des trois autres. Cette calibration pourra être révisée si, dans un délai de trois mois, l'attributaire fournit un certificat de calibration délivré par un laboratoire officiel reconnu et avec expérience dans ce type de mesures (Ispra en Italie, CIEMAT en Espagne,...).

Ces modules seront utilisés ultérieurement pour vérifier que la puissance réelle installée dans les systèmes de pompage sur le terrain correspond à la puissance contractuelle tel que défini ci-dessus.

Le transport correspondant d'un côté, à l'envoi des composants objet de tests à l'adresse de l'UPM/IES, et de l'autre, à leur renvoi de l'UPM/IES au siège de l'attributaire suite à la finalisation des essais, sera sous la responsabilité de l'attributaire et les coûts engendrés seront à sa charge. Ceci inclut toute la gestion associée à ces opérations (démarches auprès de la douane, etc.).

Mis à part les essais réalisés avant l'attribution définitive, d'autres essais seront aussi réalisés sur les sites. Ces essais seront nécessaires pour l'acceptation finale des systèmes et sont décrits dans l'article 6 : «Réception des systèmes».

## **ARTICLE 6 : RECEPTION DES SYSTEMES**

La réception des systèmes consistera en une réception provisoire, à effectuer après la finalisation de l'installation des systèmes. Elle consistera en tests appropriés pour vérifier leur fiabilité et leur bon fonctionnement.

La réception définitive aura lieu 12 mois après la réception provisoire, et consistera en des tests identiques.

### **6.1 RECEPTION PROVISOIRE**

Une réception provisoire aura lieu pour vérifier les aspects suivants :

- Contrôle des spécifications, fonctionnement et rendements contractuels des installations,
- La bonne organisation et le bon fonctionnement du service après-vente, conformément à l'article 3 de l'annexe technique,
- Vérification quantitative de la fourniture,
- Documentation et manuels sollicités fournis dans la langue définie dans l'article 2.1.7.5.

Les parties sur lesquelles les essais et/ou spécifications porteront sont :

- Générateur photovoltaïque,
- Structure porteuse du générateur photovoltaïque,
- Groupe onduleur- moto-pompe,
- Tuyauterie,
- Câblage et prise de terre,
- Boîtes d'interconnexion,
- Installations auxiliaires (local technique, enclos, etc.),
- Têtes de puits,
- Système de potabilisation.

La réception provisoire aura lieu à la fin de l'installation dans chaque site par une délégation composée du coordinateur du projet, des représentants du maître d'ouvrage et de l'attributaire. Les frais de déplacement seront à la charge de cette même délégation. Ce déplacement donnera lieu aux mesures suivantes :

- Rayonnement solaire sur le plan des modules photovoltaïques au moyen d'un des modules calibrés tel comme spécifié en article 5.2,
- Hauteur manométrique totale (HMT) au moyen d'un manomètre et d'une sonde pour tester le niveau réel de l'eau dans le puits au moment de la mesure,
- Mesure du débit,

- Courbe I-V du générateur photovoltaïque.

Ces mesures permettront de vérifier que le rendement de l'ensemble onduleur / motopompe (défini comme le rapport entre la puissance hydraulique de la pompe et la puissance DC à l'entrée de l'onduleur) correspond au rendement mesuré du système type dans le laboratoire de l'UPM-IES avec une tolérance de  $\pm 15\%$ .

En aucun cas la puissance du générateur déduite à partir de cette mesure, suivant la norme IEC 61725, ne devra être inférieure à la puissance contractuelle tel qu'indiqué en article 2.1.4.

La réception provisoire donnera lieu à un procès-verbal signé par le coordinateur du projet et les représentants du maître d'ouvrage et de l'attributaire. Le procès-verbal sera remis à l'attributaire pour lui permettre de couvrir le second paiement tel que défini à l'article XXVI des « Prescriptions particulières ».

La non-satisfaction aux tests empêchera la signature du procès verbal jusqu'à ce que l'attributaire prenne toutes les mesures nécessaires pour que soient satisfaits les requis techniques. Les installations et les travaux de mise en conformité seront contrôlés lors d'une nouvelle réception provisoire dont les coûts seront à la charge de l'attributaire.

## **6.2 RECEPTION DEFINITIVE**

La réception définitive aura lieu 12 mois après la réception provisoire. Elle sera précédée d'une tournée de contrôle des installations et du maintien des performances contractuelles des équipements, de la même manière que lors de la réception provisoire. La prononciation de la réception définitive donnera lieu à l'établissement d'un procès verbal qui permettra de recouvrer le paiement correspondant tel que défini dans l'article XXVI des « Prescriptions particulières ».



## **ARTICLE 7 : CRITERES TECHNIQUES ADITIONNELLES D'EXCLUSION**

Les principaux critères d'exclusion sont rappelés ici :

- Systèmes de pompage incluant des batteries,
- Générateurs photovoltaïques ne respectant pas la norme IEC 61215,
- Pompes non immergées,
- Moteurs à courant continu avec balai,

Enfin, pour un lot donné, l'offre ne doit pas proposer plus d'un seul type de matériel pour chacun des systèmes-types.